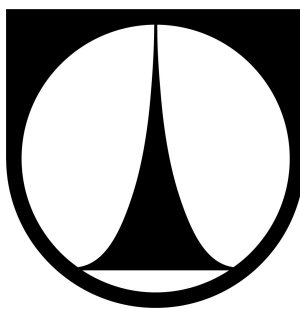


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341-Strojírenství

Materiály a technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
oddělení strojírenské metalurgie

**Optimalizace dvouelipsoidního modelu zdroje tepla simplexovou
metodou**

**Optimalization of a double-ellipsoid heat source model by the simplex
method**

Jan Šlechta
KSP – SM – B54

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D. – TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran : 53

Počet tabulek : 10

Počet příloh : 7

Počet obrázků : 27

Počet grafů : 1

Datum: 3.1.2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|------------------|---|
| Jméno a příjmení | Jan Š L E C H T A |
| Studijní program | B2341 Strojírenství |
| Studijní obor | 3911R018 Materiály a technologie |
| Zaměření | Strojírenská metalurgie |

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářské práce na téma:

Optimalizace dvouelipsoidního modelu zdroje tepla simplexovou metodou

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s metodou svařování 135 podle ČSN EN ISO 4063 a se způsobem poloautomatického experimentálního svařování touto metodou.
2. Seznamte se s simulačním programem Sysweld, včetně jeho modulů.
3. V modulu Visual Mesh vytvořte 3D modely koutových svarů podle reálných experimentů.
4. Proved'te simulace svařování s nemodifikovaným dvouelipsoidním zdrojem.
5. Proved'te modifikaci dvouelipsoidního modelu zdroje tepla simplexovou metodou.
6. Proved'te celkové porovnání a vyhodnocení výsledků.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva: v rozsahu cca 30 stran
- přílohy: grafy, tabulky, makrostruktury

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):


- [1] HAVELKA, P.: *Predikce tvaru a velikosti svarové lázně u metody svařování 135 (MAG)*, [Diplomová práce], Liberec 2010, TU v Liberci, FS.
- [2] MORAVEC, J.: *Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně, při svařování v ochranných atmosférách*, ISBN 978-80-7372-805-2, 2011.
- [3] MORAVEC, J.: *Analýza kritických míst programem MOVYPRO 07 na základě simulací v programu SYSWELD*, Liberec 2008, ISBN 978-80-7372-403-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry




doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 31. 10. 2013

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



A N O T A C E

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

**Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program: B2341 - Strojírenství

Student: Jan Šlechta

Téma práce: Optimalizace dvouelipsoidního modelu zdroje tepla
simplexovou metodou

Optimization of a double-ellipsoid heat source model by
the simplex method

Číslo BP: KSP – SM – B54

Vedoucí BP: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D. – TU v Liberci

Abstrakt:

Úkolem této bakalářské práce bylo zjištění, zda a případně jak se změní matematický popis dvouelipsoidního zdroje tepla při svařování se stejně nastaveným svařovacím proudem, ale s rozdílnou rychlostí svařování. V bakalářské práci je popsán postup prací při tvorbě prostorového modelu v programu Sysweld, definování dvouelipsoidního modelu zdroje tepla a následná úprava (modifikace) tvaru zdroje tepla tak, aby tvar svarové lázně odpovídal s co největší přesností reálným svarům. Pro simulační výpočty bylo použito sedm reálně provedených svarů.

Abstract:

The purpose of this thesis was to find out if, and in that case also how, a mathematical model of a double-ellipsoid heat source changes with welding pace, while the welding current remains constant. The thesis discusses building of a special model in the Sysweld program, definition of the double-ellipsoid heat source and modification of the heat-source shape so that the shape of the weld pool matches a real weld as closely as possible. In total, seven different welds were simulated and compared with experiments.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 3. Ledna 2014

.....
Jan Šlechta
Lesní 1283
464 01 Frýdlant

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaromír Moravec, Ph.D. za cenné rady a připomínky při psaní bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za umožnění studia na vysoké škole.

OBSAH:

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | |
|---|-----------|
| 1. Úvod | 10 |
| 2. Teoretická část | 11 |
| 2.1. Princip obloukového svařování | 11 |
| 2.1.1. Statická charakteristika zdroje | 12 |
| 2.2. Svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách | 13 |
| 2.2.1. Svařování tavnou kovovou elektrodou v aktivním prostředí (MAG) ... | 14 |
| 2.2.2. Princip metody MAG | 17 |
| 2.2.3. Přenos svarového kovu do lázně u metody MAG | 17 |
| 2.2.4. Základní procesní parametry | 20 |
| 3. Simulační program Sysweld | 21 |
| 3.1. Struktura programu Sysweld | 21 |
| 3.2. Vstupní data numerických simulací svařování | 22 |
| 3.2.1. Materiálová vstupní data | 22 |
| 3.2.2. Data pro definici a popis tvaru tepelného zdroje | 23 |
| 3.2.2.1. Teplotní pole od dvouelipsoidního zdroje tepla | 24 |
| 3.2.3. Vytvoření prostorového modelu | 26 |
| 4. Experimentální část | 28 |
| 4.1. Tvorba modelu | 30 |
| 4.2. Postup při návrhu modelu | 31 |
| 4.3. Hraniční body plošného modelu | 32 |
| 4.4. Účel a tvorba 1D elementů | 33 |
| 4.5. Edge a domény | 34 |
| 4.6. Diskretizace a síťování 2D modelu | 36 |
| 4.7.1. Vytvoření prostorového modelu | 38 |
| 4.7.2. Diskretizace a síťování 3D modelu | 38 |
| 4.8. Vytvoření pomocných skupin elementů a uzlových bodů | 39 |
| 5. Simulace geometrie svarové lázně | 41 |
| 5.1. Simulace procesu svařování pro nemodifikovaný zdroj tepla | 42 |
| 5.2. Program pracující na úpravě koeficientů k , l , m | 45 |

| | |
|---|-----------|
| 6. Závěr | 49 |
| 7. Seznam použité literatury | 51 |
| 8. Seznam příloh | 53 |

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | | |
|------------------------|---|----------------------|
| $g(x,y,\xi)$ | hustota tepelného toku do materiálu | [W/m ³] |
| P_s | celkový výkon zdroje | [W] |
| w, b_{max}, c_1, c_2 | parametry natavené oblasti | [m] |
| l_c | celková délka svarové lázně | [m] |
| x, y, z | souřadnice bodů | [m] |
| f_1, f_2 | konst. ovlivňující rozložení intenzity toku energ. do mat | [-] |
| τ | celkový čas svařování | [s] |
| t | okamžitý čas svařování | [s] |
| v_s | rychlost svařování | [m/s] |
| ξ | poloha zdroje v závislosti na době svařování | [m] |
| z_k | souřadnice osy z při ukončení svařování | [m] |
| I_{ef} | efektivní proud | [A] |
| U_{ef} | efektivní napětí | [V] |
| k, l, m | koeficienty na úpravu geometrie zdroje tepla | [-] |
| P_s | skutečný výkon zdroje tepla | [W] |
| I_{ef} | efektivní proud | [A] |
| U_{ef} | efektivní napětí | [V] |
| η | účinnost zdroje tepla | [-] |
| Q_{vn} | vypočet vneseného tepla | [kJ/cm] |
| λ | součinitel tepelné vodivosti | [W/m.K] |
| c | měrné teplo | [J/kg.k] |
| ρ | hustota | [kg/m ³] |
| β | koeficient přestupu tepla do okolí | [-] |
| E | Youngův modulu pružnosti | [Pa] |
| R_e | smluvní meze kluzu | [Pa] |
| R_m | smluvní meze pevnosti | [Pa] |
| H | hodnota deformačního zpevnění | [-] |
| μ | Poissonovy konstanta | [-] |
| α | součinitel teplotní roztažnosti | [K ⁻¹] |
| HF | vysokofrekvenční zapalování | [-] |
| MIG | svařování s tavící se kovovou elektrodou v netečném prostředí | [-] |

| | | |
|---------------------------------|---|-----|
| MAG | svařování s tavící se kovovou elektrodou v aktivním prostředí | [-] |
| WIG (TIG) | svařování wolframovou netavící se elektrodou v netečném prostředí | [-] |
| Ar | argon | [-] |
| He | helium | [-] |
| O ₂ | kyslík | [-] |
| Si | křemík | [-] |
| Mn | mangan | [-] |
| CO ₂ | oxid uhličitý | [-] |
| MKP | metody konečných prvků | [-] |
| A ₁ - A ₇ | názvy svarů | [-] |
| P | názvy hraničních bodů | [-] |
| L | názvy 1D elementů | [-] |
| F | názvy „edgei“ | [-] |
| D | názvy domén | [-] |

1. Úvod

Svařování patří spolu s tvářením k nejstarším technologiím zpracování kovů. Technologie svařování má několik vývojových metod, tou nejstarší je svařování v ohni, což je takzvané kovářské svařování. Tato metoda byla dlouho jedinou známou do doby, než vznikl koncentrovaný zdroj tepla, který slouží k lokálnímu natavení kovu, což je reprezentováno především svařováním kyslíko – acetylenovým plamenem a svařováním elektrickým obloukem. Dalším typem svařování je svařování elektrickým odporem a poslední zmiňovanou etapou je pak uplatnění fyzikálních způsobů ve svařování. [1]

Hlavním úkolem svařování je především úspora materiálu při náhradě odlitků i výkovků svarky. Tuto metodu je možné uplatnit i při navařování, nebo při opravách a renovacích strojních součástí.

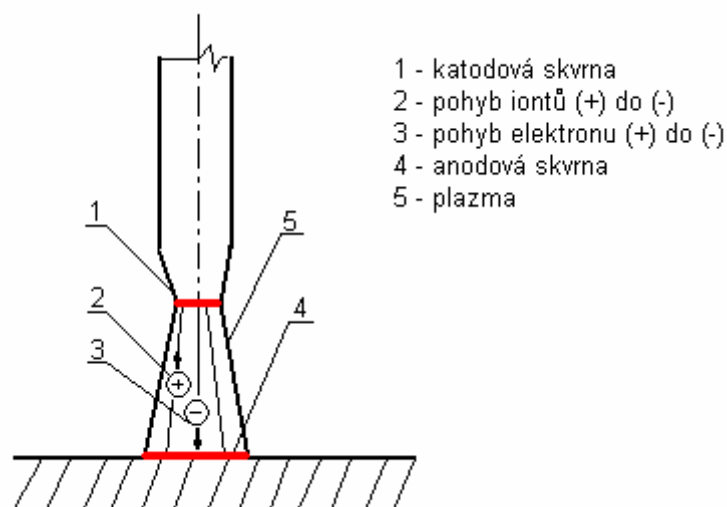
Svařování se využívá skoro ve všech průmyslových oborech – jak v opravárenství, tak i při výrobě nových drobných dílů nebo rozměrnějších ocelových konstrukcí.

2. Teoretická část

V teoretické části je detailněji popsán princip obloukového svařování, především tavící se elektrodou v ochranném plynu. Jsou zde popsány způsoby přenosu kovu v oblouku a vliv základních procesních veličin. Dále je zde popsán simulační program Sysweld, včetně jeho struktury a nároků na vstupní data. Zvláštní pozornost je věnována popisu modelů zdroje tepla, protože tato část je úzce navázána na experimentální část.

2.1. Princip obloukového svařování

Svařování elektrickým obloukem patří mezi nejpoužívanější metody tavného svařování. Elektrický oblouk slouží k natavení přídavného a základního materiálu. Elektrický oblouk je fyzikálně definován jako samovolný elektrický výboj, který vzniká v ionizovaném prostředí směsi plynu. Ionizované prostředí je vodivé a prochází jím elektrický proud. K ionizaci je nutné plynnému prostředí dodat energii (tepelnou nebo tlakovou). Toho lze u elektrického oblouku dosáhnout dvěma způsoby. Prvním je využití zkratu, při kterém prudce roste proud a díky tomu je zkratovaná oblast intenzivně zahřáta a následně ionizována. Po oddálení elektrody roste napětí a dojde k zapálení a ustálení elektrického oblouku. Druhým způsobem je využití vysoce napěťové jiskry (při vysokofrekvenčním zapalování HF), kterou je plyn ionizován. [2]



Obr.1 Schéma hoření elektrického oblouku

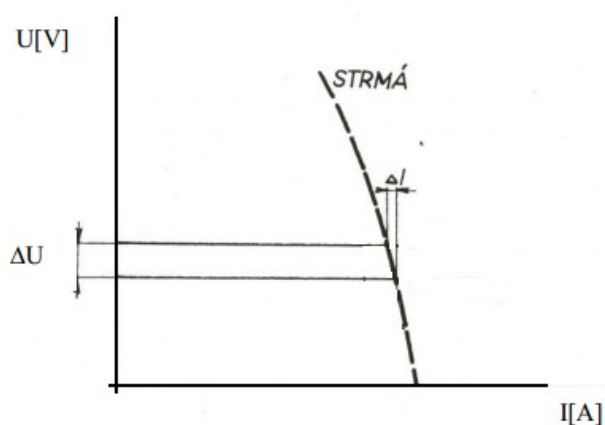
Elektrický oblouk (schematický obrázek 1) se skládá ze dvou oblastí a sloupce oblouku. Katodová oblast (skvrna) je velmi malá, v řádu $0,00001 - 0,0001\text{mm}$ a vycházejí z ní elektrony. Anodová skvrna je větší, v řádu $0,001 - 0,01\text{mm}$ a pohlcují se na ní elektrony. Sloupec oblouku je vytvořen plazmatem, což je čtvrté skupenství hmoty. Jedná se také o místo, kde dochází k ionizaci plynu. [2]

Teplota ve sloupci oblouku se podle metody svařování a nastaveného svařovacího proudu pohybuje v rozmezí od $5000 - 9000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Čím je tato teplota vyšší, tím větší je procento ionizace a oblouk hoří stabilněji. Teplota elektrického oblouku je nutná k lokálnímu natavení základního materiálu, ale k natavení je použito pouze teplo anodové nebo katodové oblasti, které je ovšem mnohem nižší než ve sloupci oblouku. [2]

2.1.1. Statická charakteristika zdroje

Statická charakteristika vyjadřuje závislost mezi svařovacím proudem a napětím s ohledem na konstrukci svařovacího zdroje. Statické charakteristiky zdroje se dělí na strmé a ploché, případně na polostrmé.

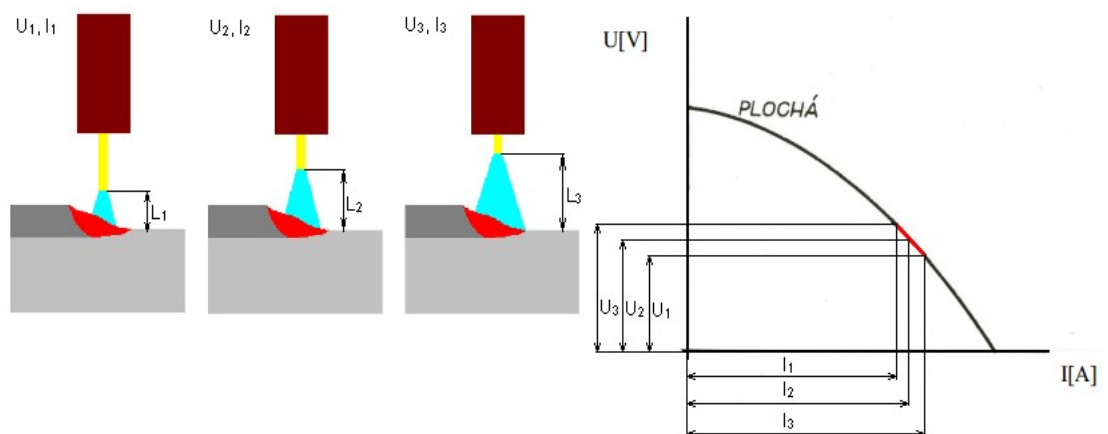
Strmá statická charakteristika (obr. 2) je necitlivá na změnu délky oblouku a používá se zejména u metod bez podávacích zařízení, například u ručního obloukového svařování obalenou elektrodou, plazmového svařování, nebo svařování netavicí se elektrodou v inertním plynu (TIG). [3]



Obr.2 Strmá statická charakteristika zdroje

Jak již bylo řečeno, strmá statická charakteristika zdroje je vhodná pro ruční svařování, protože je jen na svářečových schopnostech, jak povede elektrodu nad svařovaným materiálem, protože i při větších změnách délky oblouku se svařovací proud mění jen nepatrně. Z uvedeného vyplývá, že se změny délky oblouku neprojeví významně na kvalitě svaru a zejména na množství odtaveného materiálu. [3]

Plochá charakteristika se naopak používá u metod svařování, kde je tavící se elektroda automaticky podávána do místa svaru. Patří sem metody MIG/MAG, ale také například svařování pod tavidlem. Tato metoda reaguje velice rychle na jakoukoliv změnu délky oblouku (změna napětí), změnou svařovacího proudu. Znamená to, že při změně délky oblouku, se změnou svařovacího proudu zvýší nebo sníží rychlost odtavování. Díky tomu je délka oblouku automaticky regulována a mluvíme zde o tzv. samoregulaci. Na obrázku 3 je schematicky ukázána samoregulace pomocí ploché statické charakteristiky zdroje.



Obr.3 Plochá statická charakteristika zdroje

2.2. Svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách

Svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách patří v současné době k technologiím, které zaznamenávají největší rozvoj ve strojírenství. Jeho podíl se proti jiným technologiím zvětšuje, což je způsobeno zejména vysokou produktivitou, zlepšením hygieny prostředí, možností svařovat ve všech polohách a umožněním automatizace

a robotizace svařování. Při tomto způsobu svařování je svarová lázeň chráněna před nepříznivými účinky okolního prostředí ochrannou atmosférou, která může být inertní nebo aktivní. Inertní atmosféry nevstupují do chemických reakcí se svarovou lázní. Pro tyto účely se používá argon (Ar), helium (He) nebo jejich směsi. Aktivní atmosféry se podílejí na chemických reakcích ve svarové lázni, jejich působení ale může být kompenzováno vhodným složením přídavného materiálu. [2] Svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře dále dělíme především na tyto hlavní metody svařování:

MIG – Metel Inert Gas

- Svařování s tavící se kovovou elektrodou v netečném prostředí

MAG – Metal Aktiv Gas

- Svařování s tavící se kovovou elektrodou v aktivním prostředí

WIG (TIG) – Wolfram Inert Gas

- svařování wolframovou netavicí se elektrodou v netečném prostředí

2.2.1. Svařování tavící se elektrodou v aktivním prostředí (MAG)

Metoda MAG je založena na svařování tavící se kovovou elektrodou v aktivním prostředí. Elektrický oblouk vzniká mezi kovovou elektrodou a svařovaným materiálem v aktivní atmosféře plynu. Jako aktivní atmosféra se většinou používá čistý oxid uhličitý (CO_2) nebo jeho směsi s argonem v různých poměrech. Výrobci v této oblasti nabízejí i vícekomponentní (nejčastěji tříkomponentní) ochranné atmosféry. V současné době se pro svařování většiny ocelových konstrukcí využívá především ochranná směs $\text{Ar}+\text{CO}_2$ (ISO 14175-M21). [4]

Jednotlivé ochranné plyny mají své klady a zápory. Zápory jednotlivých čistých komponent lze kompenzovat mísením s dalšími komponentami, tedy tvorbou směsných atmosfér. V následujícím jsou ukázány základní vlastnosti jednotlivých nejpoužívanějších složek ochranných atmosfér, tedy Ar, CO_2 , O_2 .

Oxid uhličitý- Plynný CO_2 má mírně dráždivý zápach, je bezbarvý a těžší než vzduch.

- Reaktivní - oxidující
- Těžší než vzduch
- Dobrá teplotní vodivost
- Vysoké povrchové napětí svarové lázně
- Značný rozstřík, velká kouřivost
- Propal legur – nutno legování drátu desoxidanty Si, Mn
- Čisté CO_2 zabraňuje sprchovému procesu
- Pouze zkratový proces
- Umožňuje svařování v polohách
- Pomalé tuhnutí svarové lázně
- Svařování ocelí

Argon- neutrální a bezbarvý plyn,

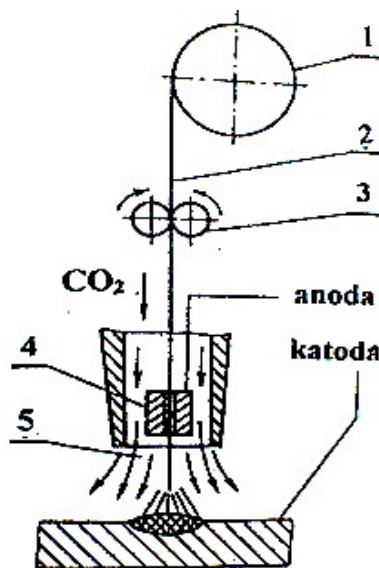
- Atomární
- Inertní
- Těžší než vzduch
- Nízký ionizační potenciál
- Špatná teplotní vodivost
- Vysoké povrchové napětí svarové lázně
- Nízká úroveň rozstříku
- Žádný propal legujících prvků
- Umožňuje sprchový proces
- Rychlé tuhnutí svarové lázně
- Svařování neželezných kovů

Kyslík- plyn bezbarvý, bez chuti a bez zápachu, který je silně reaktivní v přítomnosti dalších chemikálií.

- Rozšiřuje závar
- Zvyšuje množství vneseného tepla
- Zvyšuje teplotu svarové lázně

- Snižuje povrchové napětí svarové lázně
- Zužuje oblast přechodového oblouku
- Zvyšuje tvorbu strusky
- Ve větším množství značně zvyšuje kouřivost
- Vhodný pro tvorbu trojkomponentních směsí Ar-CO₂-O₂
- Značný propal legur – Si, Mn

Vlastnosti svarového kovu je možné dále měnit úpravou chemického složení. Toho je (kromě vlivu ochranné atmosféry) dosaženo především legováním přídavného materiálu. Elektrody jsou legovány manganem (Mn) a křemíkem (Si), především z důvodu dezoxidace, protože tyto prvky mají větší afinitu ke kyslíku než železo. Vzniklé oxidy vytváří malou vrstvu strusky na povrchu svaru. Metoda MAG se vyznačuje hlubokým závarem a relativně úzkým svarem, díky tomu je možné svařovat plechy do tloušťky 4mm bez úkosů. Metoda MAG nachází velké uplatnění zejména při výrobě ocelových konstrukcí a v opravárenství.



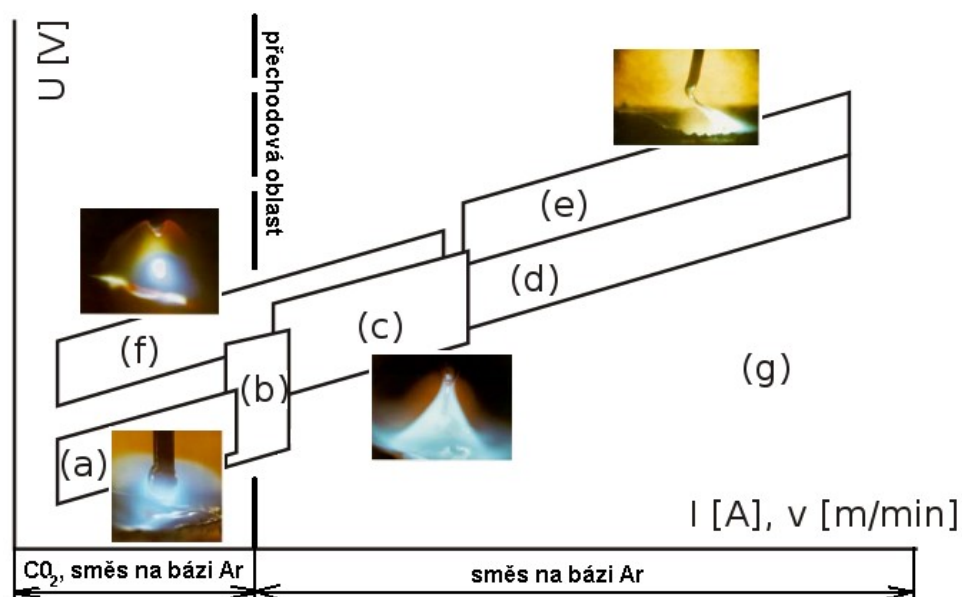
Obr. 4 Schéma principu svařování v CO₂ : 1 – cívka s přídavným materiálem, 2 – svařovací drát, 3 – podávací zařízení (kladky), 4 – napájecí průvlak, 5 – ochranná clona plynu

2.2.2. Princip metody MAG

Princip svařování v ochranné atmosféře (obr.4) je založen na tom, že holý svařovací drát (2) navinutý na cívce (1) je veden přes podávací kladky (3) do napájecího průvzlaku (4). Napájecí průvzlak je uvnitř ochranné hubice (5). V napájecím průvzlaku je tavící se elektrodě předán proud a volný konec drátu (výlet drátu) mezi průvzlakem a elektrickým obloukem je díky tomu předeřhříván odporovým teplem. Směs plynu pak chrání oblouk a tavnou lázeň před přístupem okolní atmosféry. Oblouk hoří mezi tavící se elektrodou a základním materiálem. Svařuje se stejnosměrným proudem, kde elektroda je připojena na kladný pól (anodu) a základní materiál je připojen na záporný pól (katodu), nebo v pulzním režimu. [2]

2.2.3. Přenos svarového kovu v oblouku

Pod pojmem přenos svarového kovu v oblouku si je možné představit způsob tavení přídavného materiálu (svařovacího drátu nebo elektrody) a jeho ukládání do svarové lázně. Existují dva základní přenosy kovu v oblouku a to: přenos zkratový a přenos bezkratový. Bezzkratový přenos je možné dále rozdělit na přenos kapkový, sprchový, moderovaný a přenos rotujícím obloukem. Zvláštním způsobem přenosu kovu je pak přenos impulzní (pulzní). [3], [4], [5]



Obr. 5. Oblasti přenosu svarového kovu v oblouku

Pomocí základních procesních parametrů především proudu a napětím je možné ovlivňovat způsob přenosu kovu (obr.5). Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2.1. způsob přenosu kovu je silně ovlivněn systémem základní materiál - přídatný materiál - ochranný plyn. Například použitím plynové ochrany čistým CO₂ je dosaženo pouze zkratového přenosu kovu. [3], [4], [5]

Dále uvedené rozsahy svařovacích proudů pro jednotlivé oblasti jsou vztaženy pro svařování běžných uhlíkových ocelí v ochranné atmosféře směsného plynu M21 dle ČSN EN ISO 14175.

a) Přenos zkratový

- svařuje se v atmosféře oxidu uhličitého a směsi na bázi argonu
- konec narůstající kapky se dotkne svarové lázně dříve, než se kapka oddělí od elektrody, čímž nastává zkrat
- frekvence zkratu je od 20Hz do 200Hz
- vzniká při hodnotách proudu od 60A do 180A v rozsahu napětí od 14V do 22V
- s rostoucím napětím klesá frekvence kapek a zvyšuje se velikost kapky [5], [6]

b) Přenos kapkový

- vznikne navýšením proudu v rozmezí od 190A do 300A při napětí v rozsahu od 22V do 28V
- kapka se díky gravitačním silám odtrhne od konce elektrody dříve, než se kapka dotkne svarové lázně.
- vznikající kapky mohou být velké až jako průměr elektrody. Tento způsob je dnes již na ústupu z důvodu vzniku velkého rozstříku a tvoření hrubých housenek [5], [6]

c) Přenos sprchový

- vzniká při nastavení proudu od 280A do 500A s napětím od 28V do 40V
- bezzkratový přenos
- při vysokém proudu se nestačí vytvořit větší kapky, ale působením elektromagnetických sil se tvoří drobné kapky s vysokou frekvencí 150Hz až 350 Hz, což připomíná sprchu
- výhodou je malý rozstřík [5], [6]

d) Přenos moderovaný

- lze dosáhnout při proudu od 450A do 750A a napětí od 40V do 50V
- vznikají velké kapky, které jsou přenášeny za vysoké frekvence do rychle proudícího plazmatu
- lze dosáhnout velkého průvaru [5], [6]

e) Přenos rotujícím obloukem

- proud je ve stejných mezích jako u moderovaného přenosu, ale s větším napětím
- rotujícím obloukem lze dosáhnout hlubokého a širokého závaru [5], [6]

f) Přenos pulzní

- z důvodu rozstříku a vzniku vad ve svařích u zkratového a kapkového přenosu vznikl pulzní přenos
- svařovací proud je nastaven tak, aby probíhala ionizace plynu a vedení el. proudu, ale do svaru se vnáší méně tepla
- svařovací proud a napětí závisí na čase, ten je mikroprocesorovým zdrojem modulován
- v intervalech zvyšujeme proud a napětí, tím vznikají pulzy těmi se přenáší kapky roztaveného přídavného materiálu do místa svaru
- frekvence pulzu je od 25Hz do 500Hz
- výhoda vysoký výkon odtavení při nižším vneseném teple [5], [6]

2.2.4. Základní procesní parametry

Pomocí základních parametrů se může ovlivňovat přenos tepla, tvar a rozměr svaru. Mezi základní procesí parametry svařování patří svařovací proud, napětí, rychlost postupu svařování, rychlost podávání svařovacího drátu, nebo proudová hustota. Jsou to parametry, které lze nastavit před svařováním. [5], [7]

- *Svařovací proud* může dosahovat hodnot od 30 A, používaných pro tenké plechy, až po 800 A u mechanizovaných metod. S rostoucím proudem narůstá rychlost postupu svařování i rychlost podávání svařovacího drátu. Při zvýšení proudu se při konstantní šířce svaru zvětší hloubka závaru. Změna proudu ovlivňuje způsob přenosu kovu, což bylo zmíněno v předchozí kapitole 2.2.3. [5], [7]
- *Svařovací napětí* ovlivňuje šířku svarové housenky a stanovuje se v závislosti na svařovacím proudu. Je úzce spjato s délkou oblouku. Pokud se zvětší napětí zvětší se převýšení svaru a zmenší se hloubka protavení. [5], [7]
- *Svařovací rychlost* ovlivňuje tvar svaru. Pokud je svařovací rychlost vysoká tvoří se široká housenka s velkým převýšením a malým závarem. Svařují se takto tenké plechy. Při nízké svařovací rychlosti se tvoří úzká housenka s malým převýšením a hlubokým závarem. [5], [7]

Pro metodu MAG jsou většinou použity holé dráty o průměru 0,8mm; 1,0mm; 1,2mm, nebo trubičkové plněné dráty nejčastěji průměru 1,6 mm. Z hlediska struktury výroby se velice často používají svařovací poloautomaty, svařuje se převážně zkratovým procesem, drátem o průměru 1,2mm a svařovacím proudem do 300A. [2]

Výhody metody MAG

- velká produktivita
- velká odtavovací rychlost elektrody
- nízká cena plynu
- čistota pracovního prostředí

3. Simulační program Sysweld

S vývojem nových materiálů s určitými vlastnostmi a se stoupajícími požadavky na mechanické vlastnosti a jakost svarového spoje přichází současně rozvoj simulačních programů pro svařování. Aby se dosáhlo vysoké jakosti a kvality spojů, často se musí provést řada experimentálních kontrolních svarů. Ty se provádí před samotným svařováním skutečných prvků. Výše zmíněné experimenty slouží například k potvrzení vhodnosti vybrané technologie svařování materiálu, teploty přehřevu, přídavného materiálu, atd. Toto ověřování je samozřejmě časově náročné a také zdražuje výrobu. Proto jsou numerické simulace ve svařování stále vyhledávanější alternativou a nacházejí stále širší uplatnění. [8], [9], [10]

Sysweld je simulační program, který pracuje na principu metody konečných prvků (MKP). Výhodou tohoto principu je schopnost vypočítat jakékoliv tvarové zakřivení a lze jím i řešit jednotlivé podskupiny prostorového modelu samostatně. Proto je zde možné, na rozdíl od metody konečných diferencí, použít libovolný tvar jednotlivých elementů. Metoda konečných prvků se z matematického hlediska využívá pro nalezení přibližného řešení parciálních diferenciálních i integrálních rovnic, například rovnice vedení tepla. [10]

3.1. Struktura programu Sysweld

Vlastní program je rozdělen do několika samotných modulů, které mezi sebou vzájemně pracují.

- **Geom/Mesh** – slouží pro vytvoření 2D a 3D modelu a k nastavení dráhy pohybu zdroje tepla pro svařování i přehřev
- **Sysweld/Generic** – slouží k nastavení všech teplotně-metalurgických dějů, vznikajících při ohřevu a chladnutí materiálu
- **H.T Advisor** – zabývá se sdílením tepla v modelu, hlavně vedením tepla v základním modelu a sáláním tepla do okolí
- **Welding Advisor** – slouží nastavení zdroje tepla a jeho dráhy, načítá prostorový model z Geom/Mash a přiřazuje materiál z databáze
- **Assembly Advisor** – pracuje s vypočítanými daty z modulu Welding Advisor [10]

3.2. Vstupní data numerických simulací svařování

Simulační výpočty mají co nejvíce vystihnout reálný stav simulovaného děje nebo se mu alespoň co nejvíce přiblížit. I přesto se musí respektovat řada omezení, které snižují přesnost simulačních výpočtů. Aby se úloha přiblížila reálnému stavu, musí se dobře matematicky popsat. Tudíž vstupním datům má být věnována vysoká pozornost, protože čím přesnější vstupní data, tím přesnější simulační výpočet. [10]

Rozdělení vstupních dat:

- Materiálová vstupní data
- Data pro definici a popis tvaru tepelného zdroje
- Data pro vytvoření prostorového modelu

3.2.1. Materiálová vstupní data

Materiálová vstupní data jsou nejčastěji získaná z literatury a doupřesněná měření na zkušebních vzorcích. Tato vstupní data často ovlivňují výslednou přesnost numerických analýz. Materiálová data použitá pro mechanickou analýzu, ale mohou být i v rámci jednotlivých kategorií materiálu velice rozdílná. Je tedy důležité nalézt materiálová data pro každý určitý materiál. Veškerá materiálová vstupní data je třeba získat ve formě teplotních závislostí a v případě výpočtu fázových přeměn i pro každou fázi zvlášť. [10]

Materiálová vstupní data pro teplotně-metalurgickou analýzu

1. chemické složení
2. diagramy ARA a IRA
3. teplotní závislost měrné tepelné vodivosti λ
4. teplotní závislost měrného tepla c
5. teplotní závislost hustoty ρ
6. teplotní závislost koeficientu přestupu tepla do okolí β [10]

Materiálová vstupní data pro mechanickou analýzu

1. teplotní závislost Youngova modulu pružnosti E
2. teplotní závislost smluvní meze kluzu R_e
3. teplotní závislost smluvní meze pevnosti R_m
4. teplotní závislost hodnot deformačního zpevnění H
5. teplotní závislost Poisonovy konstanty μ
6. teplotní závislost koeficientu lineární roztažnosti α [10]

3.2.2. Data pro definici a popis tvaru tepelného zdroje

Při numerických simulacích svařování máme pouze jeden zatěžující účinek, a to je rozložení teplotních polí v jednotlivých časových okamžicích. Teplota $T(x,y,z,t)$ je funkcí souřadnic v prostoru a čase. Přesné stanovení teplotního pole pro svařování je nutné, kvůli správnému určení struktury materiálu, deformace a zbytkového napětí. To je důležitým bodem pro dobrou numerickou simulaci. [10]

Rozdělení modelů tepelných zdrojů:

- jednorozměrné
- dvojrozměrné
- trojrozměrné

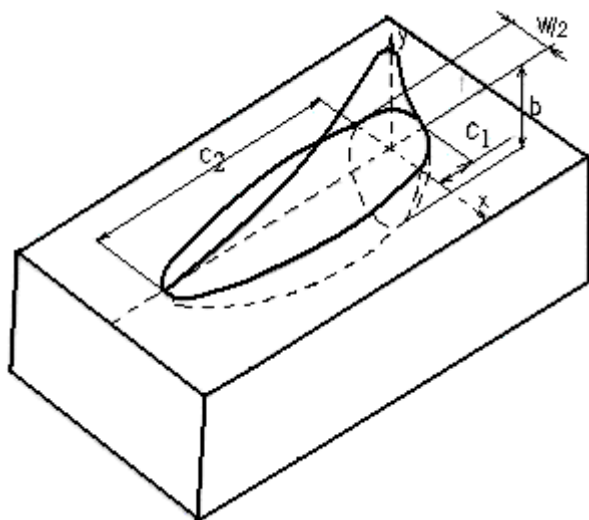
Jednorozměrné a dvojrozměrné modely tepelného zdroje jsou poměrně jednoduché pro matematické popsání, ale výsledek vykazuje velké odchylky od reálných teplotních polí. Výsledek trojrozměrného tepelného zdroje má dobrou shodu s reálným teplotním polem, ale jeho matematický popis je poměrně náročný na výpočet a také trvá o poznání déle. [10]

Druhy používaných modelů tepelných zdrojů pro tavné svařování:

- bodový zdroj
- lineární zdroj
- rovinný zdroj
- zdroj s Gaussovým rozložením tepla
- polokulový zdroj
- elipsoidní zdroj
- dvouelipsoidní zdroj
- prostorový zdroj s Gaussovým rozložením tepla [10]

3.2.2.1. Teplotní pole od dvouelipsoidního zdroje tepla

Dvouelipsoidní zdroj tepla poměrně přesně vystihuje reálný stav svařování. Tento zdroj tepla v modifikované formě můžeme použít pro skoro všechny běžné metody tavného svařování. Dvouelipsoidní zdroj je spojení dvou do sebe zasazených elipsoidů, které je popsáno dvěma rovnicemi (1, 2). V rovnicích (1) a (2) se objevují parametry f_1 , f_2 , což jsou konstanty ovlivňující rozložení intenzity toku energie do materiálu. Pro konstanty f_1 a f_2 musí platit rovnice (3). [10]



Obr. 6 Model dvouelipsoidního zdroje tepla

Matematické vyjádření obr. 5

$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_1 \cdot P_s}{\frac{w}{2} \cdot b_{\max} \cdot c_1 \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{w^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b_{\max}^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{c_1^2}} \quad (1)$$

$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_2 \cdot P_s}{\frac{w}{2} \cdot b_{\max} \cdot c_2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{w^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b_{\max}^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{c_2^2}} \quad (2)$$

$$f_1 - f_2 = 2 \quad (3)$$

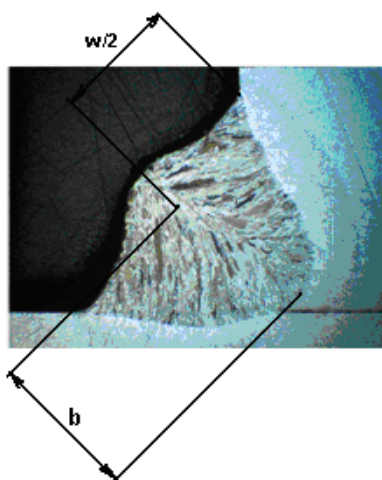
Poloha zdroje ξ je dána rovnicí (4)

$$\xi = z_k - v(\tau - t) \quad (4)$$

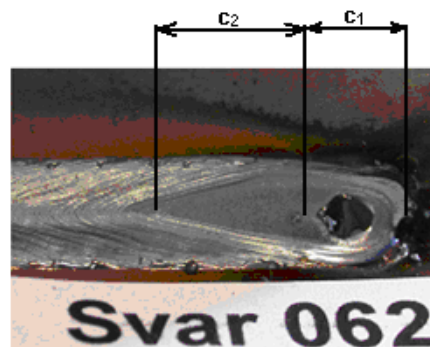
Kde:

| | | |
|------------------------|--|-----------|
| $g(x,y,\xi)$ | hustota tepelného toku do materiálu | $[W/m^3]$ |
| P_s | celkový výkon zdroje | $[W]$ |
| w, b_{max}, c_1, c_2 | parametry natavené oblasti | $[m]$ |
| x, y, z | souřadnice bodů | $[m]$ |
| f_1, f_2 | konst. ovlivňující rozložení intenzity toku energ. do mat. | $[-]$ |
| τ | celkový čas svařování | $[s]$ |
| t | okamžitý čas svařování | $[s]$ |
| v | rychlost svařování | $[m/s]$ |
| ξ | poloha zdroje v závislosti na době svařování | $[m]$ |
| z_k | souřadnice osy z při ukončení svařování | $[m]$ |

Pro použití dvouelipsoidního modelu je třeba znát hloubku a šířku natavené oblasti. Tyto parametry jsou odečteny z makrovýbrusů, tak jak je ukázáno na obrázku 7a. Délka svarové lázně se zjistí způsobem ukázaným na obrázku 7b.



Obr. 7a makrovýbrus



Obr. 7b délka svarové lázně

Na základě vědeckých prací bylo zjištěno, že nemodifikovaný model dvouelipsoidního zdroje tepla nelze používat pro všechny metody tavného svařování. Je to dáno tím, že u některých metod tavného svařování neodpovídá tento zdroj tepla reálnému stavu.

Nemodifikovaný model dvouelipsoidního zdroje tepla může být použit pro svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou. V současné době se tudíž používají dvouelipsoidní zdroje tepla v modifikované podobě, kde modifikace spočívá ve změně konstant v exponentu. Takovýto zdroj lze použít u většiny metod tavného svařování, ovšem mimo metod svařování o vysoké koncentraci energie (např. svařování laserem, plazmou, nebo svazkem elektronů). [10]

3.2.3. Vytvoření prostorového modelu

Výhodou prostorového modelu je lepší znázornění skutečnosti, oproti rovinným modelům, ale simulace prostorových modelů bývají náročnější na výpočetní čas. [10]

Model je složen z elementů a uzlových bodů. Čím větší je hustota uzlových bodů, tím vznikne podrobnější analýza. Proto je nejvíce zasíťovaná oblast svarového kovu a tepelně ovlivněná oblast (oblasti zajímavé z hlediska změn vlastností) a menší hustota uzlových bodů je ve větších vzdálenostech od svaru. Samozřejmě hustěji zasíťovaná může být jakákoliv oblast modelu svaru. [10]

Elementy v modelu dělíme na jednorozměrné, dvojrozměrné a trojrozměrné. Trojrozměrné elementy vyplňují vnitřní prostor vytvářeného modelu. Jejich velikost je daná vzdáleností uzlových bodů. Obálka prostorového modelu je tvořena dvojrozměrnými elementy, které svými rozměry kopírují rozměry trojrozměrných elementů dotýkajících se povrchu. Dvojrozměrné elementy představují plochu pro přestup tepla ze svařované součásti do okolí. Jednorozměrné elementy můžeme (ale nemusíme) v modulu použít, avšak lze jimi definovat například dráhu tepelného zdroje, dráhu pomocných hořáků pro předehřev a dohřev apod.

Tak lze určit, jestli dráha zdroje tepla je natolik komplikovaná, že popis matematickou funkcí by byl příliš těžký, a tak je lepší tuto dráhu vytvořit pomocí jednorozměrných elementů. Při volbě hustoty sítě je třeba si uvědomit, že se s vyšším počtem uzlových bodů prodlužují časy na výrobu modelu. [10]

4. Experimentální část

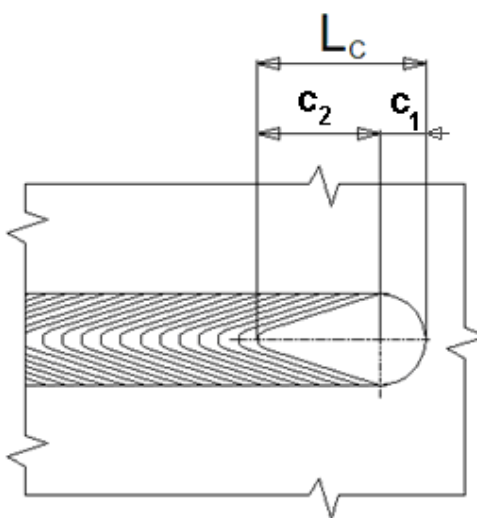
Úkolem této části práce bylo zjistit, zda a případně jak se mění matematický popis zdroje tepla při svařování se stejně nastaveným svařovacím proudem, ale s rozdílnou rychlostí svařování. Jednalo se o vytvoření celkem sedmi simulací koutových svarů získaných na základě reálně provedených experimentů. Pro každou simulaci musel být z důvodu rozdílné geometrie vytvořen nový prostorový model na kterém se simulovaly změny způsobené modifikací modelu zdroje tepla.

Pro vlastní práci byly použity údaje zjištěné v předcházejících bakalářských pracích, které se zabývaly tvarem svarové lázně při reálném svařování. Bylo použito sedm svarů (čísla svaru S5c058 – S5c064). V tabulce 1 jsou uvedeny základní nastavené i reálně změřené procesní parametry, které byly použity k definování popisu zdroje tepla.[11]

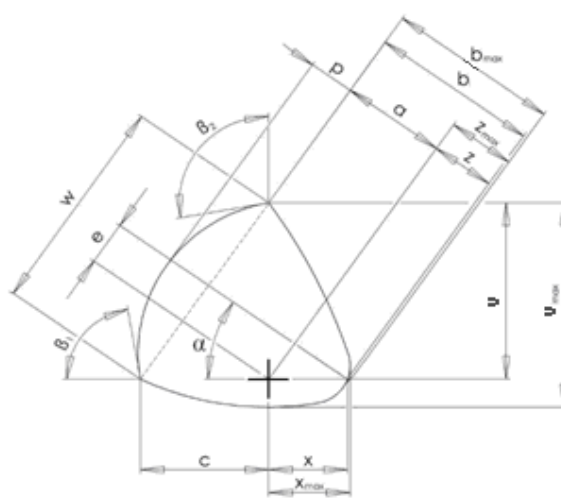
Tab.1 Údaje pro definici dvojelipsoidního modelu zdroje tepla

| Název svaru | Číslo svaru | Proud I [A] | Rychlost svařování v_s [m/min] | Efektivní proud I_{ef} [A] | Efektivní napětí U_{ef} [V] | Vnesené teplo Q_{vn} [kJ/cm] | Posun drátu [m/min] |
|----------------|-------------|-------------|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| A ₁ | Sc058 | 240 | 0,2 | 263,6 | 22,6 | 15,19 | 6,817 |
| A ₂ | Sc059 | 240 | 0,3 | 254,7 | 22,8 | 9,87 | 6,824 |
| A ₃ | Sc060 | 240 | 0,4 | 251 | 22,9 | 7,33 | 6,825 |
| A ₄ | Sc061 | 240 | 0,5 | 249,6 | 22,9 | 5,83 | 6,826 |
| A ₅ | Sc062 | 240 | 0,6 | 249,4 | 22,9 | 4,85 | 6,826 |
| A ₆ | Sc063 | 240 | 0,7 | 250 | 22,8 | 4,15 | 6,832 |
| A ₇ | Sc064 | 240 | 0,8 | 250,9 | 22,7 | 3,63 | 6,835 |

Kromě těchto údajů byly převzaty také údaje o geometrii koutového svaru. V tabulce 2 jsou uvedeny rozměry potřebných geometrických parametrů v souladu s obrázky 8a a 8b. Ze všech zjišťovaných geometrických parametrů jsou pro definování modelu zdroje tepla důležité především parametry w - šířka svarové lázně, b_{\max} - definující maximální hloubku protavení a parametry c_1 , c_2 - definující délku jednotlivých elipsoidů (kap. 3.2.2.).



obr.8a Kóty svarové lázně



obr.8b Kóty makrostruktury

Tab. 2 Vybrané parametry reálných svarů

| Název svaru | Číslo svaru | Šířka svaru w [mm] | Hloubka svaru b_{\max} [mm] | Délka svaru l_c [mm] |
|----------------|-------------|----------------------|-------------------------------|------------------------|
| A ₁ | Sc058 | 5,77 | 7,31 | 22,82 |
| A ₂ | Sc059 | 4,77 | 5,89 | 20,94 |
| A ₃ | Sc060 | 4,19 | 5,34 | 19,11 |
| A ₄ | Sc061 | 3,74 | 4,46 | 17,89 |
| A ₅ | Sc062 | 3,44 | 4,34 | 18,12 |
| A ₆ | Sc063 | 3,05 | 3,98 | 17,81 |
| A ₇ | Sc064 | 2,78 | 3,51 | 17,25 |

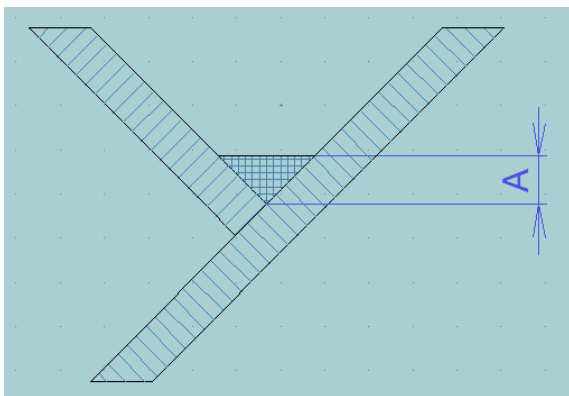
4.1. Tvorba prostorového modelu

Před vytvořením vlastního prostorového modelu je dobré si předem rozmyslet, z jakých oblastí bude celkový model složen, a jaká bude velikost jednotlivých oblastí. Toto rozvržení se děje s ohledem na možnosti následné diskretizace ovlivňující velikost jednotlivých elementů. [10]

Model se dělí na:

- oblast svarového kovu - tedy oblast tvořenou základním a přídavným materiálem. Tato oblast (u materiálu s fázovými přeměnami) vstupuje do výpočtu v jiné metalurgické fázi než základní materiál.
- tepelně ovlivněná oblast TOO - velikost této oblasti závisí na tvůrci modelu, ale většinou je ohraničena teplotou 700°C, nebo vzdáleností (obvykle 10 mm).
- oblast upevnění svařovaných dílů - oblast, která je tvořena místy dotyků upínek či jiných upínacích mechanismů
- oblast základního materiálu - ostatní oblasti modelu. [10]

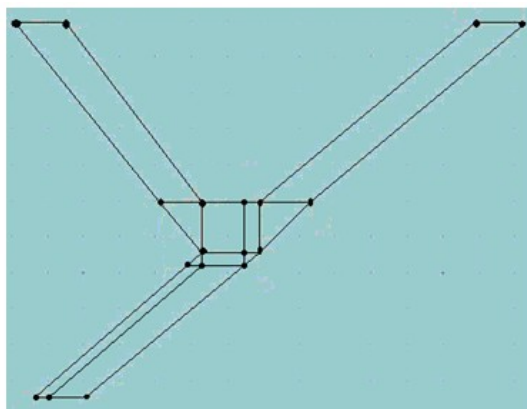
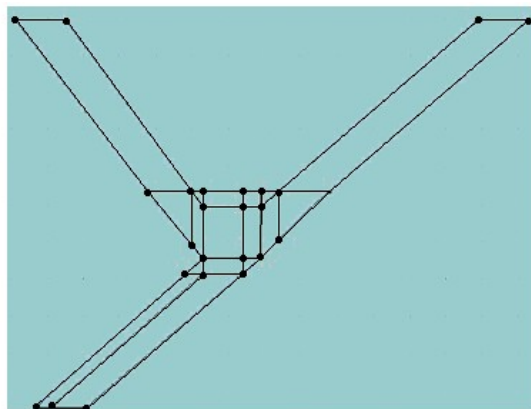
U modelů vytvořených pro simulaci koutových svarů se jednalo o zjednodušenou konstrukci. Úkolem zde nebylo vytvořit v modelu jednotlivé oblasti popsané v předchozím textu, ale zkonstruovat model tak, aby elementy a uzlové body byly orientovány rovnoběžné s osami x, y a z. Díky tomu mohlo být k modifikaci zdroje tepla využito simplexové metody. Vlastní plošný model tak byl rozdělen pouze na oblast svarového kovu a na základní materiál. Podle reálných svarů bylo vytvořeno 7 modelů lišících se velikostí koutového svaru a. Jednalo se o modely označené $A_1 = 5,5$ mm, $A_2 = 4,7$ mm, $A_3 = 4,0$ mm, $A_4 = 3,5$ mm, $A_5 = 3,2$ mm, $A_6 = 3,0$ mm, $A_7 = 2,7$ mm. Na schematickém obrázku 9 je velikost koutového svaru označena kótou A.



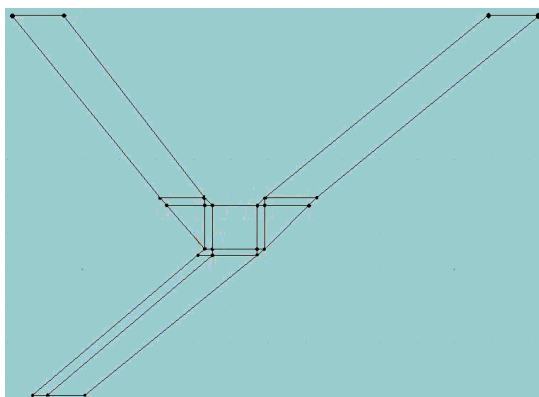
Obr.9 Schematický obrázek s kótou definující velikost koutového svaru

4.2. Postup při návrhu modelu

Při konstrukčním návrhu modelu koutového svaru je třeba uvažovat primární cíl modelu. Tyto modely byly plánovány pro modifikaci modelu zdroje tepla simplexovou metodou a z toho vycházela i jejich konstrukce. Hlavním požadavkem zde bylo, aby vytvořené uzlové body plošného modelu byly rovnoběžné s osami x a y , díky čemuž se jednodušeji vyhodnocuje velikost natavené oblasti. Z tohoto důvodu nebylo možné použít pouze jednu konstrukci plošného modelu, ale musely být vytvořeny tři různé konstrukce, tak jak je ukázáno na obrázcích 10a,b,c. Konstrukce podle obrázku 10a byla použita pro svary označené A_1 , A_2 , A_3 , konstrukce podle obrázku 10b pro svar označený A_4 a konstrukce znázorněná na obrázku 10c byla použita pro svary označené A_5 , A_6 , A_7 .



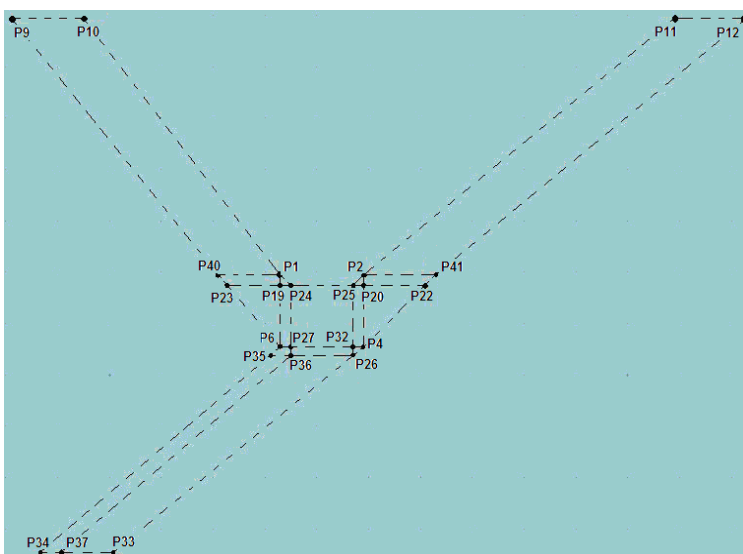
Obr. 10a návrh pro výšku svarů A_1 , A_2 , A_3 Obr. 10b návrh pro výšku svarů A_4



Obr. 10c Návrh pro výšku svarů A_5 , A_6 , A_7

4.3. Hraniční body plošného modelu

Úkolem hraničních bodů je definovat velikost jednotlivých oblastí podle příslušného konstrukčního návrhu. Na obrázku 11 jsou ukázány hraniční body vytvořené v modulu Geom/Mesh (tj. část programu Sysweld) pro plošný model svaru A₅. (V modulu Geom/Mesh proběhne tvorba modelu svaru až po kapitulu 4.8. kde se pak přechází na simulaci nemodifikovaného zdroje tepla.)



Obr.11 Hraniční body koutového svaru - 2D model (svar A₅)

Body ohraničující jednotlivé oblasti plošného modelu jsou vytvořeny na základě prostorových souřadnic, jak ukazuje tabulka 3 pro model svaru A₅. Zmíněné hraniční body jsou do programu vkládány v souřadnicích X, Y a Z. Po zhotovení plošného modelu se posuvem nebo rotací tohoto modelu vytvoří model prostorový. V případě vytvoření 3D modelu posunutím je nutné definovat tzv. vektor posunutí. Velikost vektoru a jeho směr může být definován dvěma libovolnými prostorovými body, které mohou být součástí modelu, nebo leží mimo model. [10]

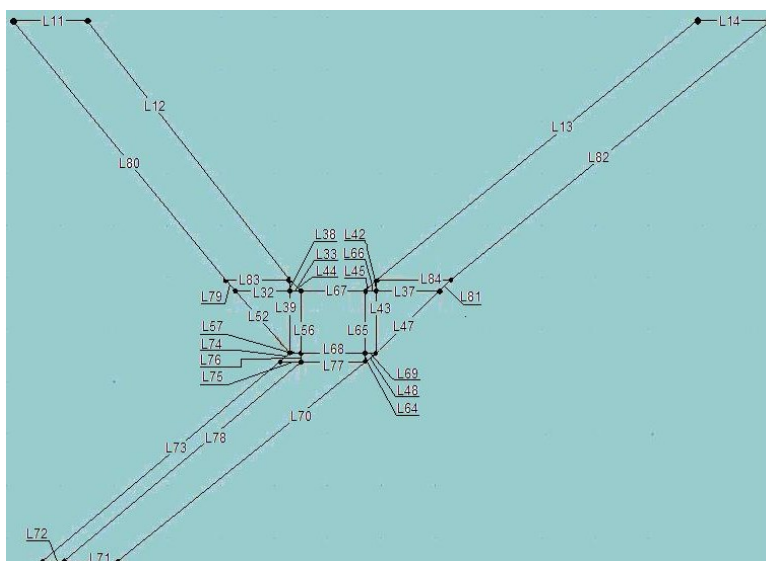
Body definující vektor posunutí jsou v tabulce 3 zvýrazněny modře. Souřadnice hraničních bodů pro ostatní modely jsou uvedeny v příloze (kapitola 8). Pro svary označené $A_1 - A_4$ to jsou tabulky 11 – 14 a pro svary A_6 a A_7 to jsou tabulky 15 a 16.

Tab.3 Prostorové souřadnice hraničních bodů (svar A_5)

| Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z |
|------|-------|------|---|------|-------|------|---|------|-------|-------|----|
| P1 | -3,5 | 3,5 | 0 | P19 | -3,5 | 3,2 | 0 | P32 | 3,2 | -3,5 | 0 |
| P2 | 3,5 | 3,5 | 0 | P20 | 3,5 | 3,2 | 0 | P33 | -16,5 | -23,5 | 0 |
| P4 | 3,5 | -3,5 | 0 | P22 | 10,2 | 3,2 | 0 | P34 | -23,5 | -23,5 | 0 |
| P6 | -3,5 | -3,5 | 0 | P23 | -10,2 | 3,2 | 0 | P35 | -3,8 | -3,8 | 0 |
| P9 | -35,5 | 28,5 | 0 | P24 | -3,2 | 3,2 | 0 | P36 | -3,2 | -3,8 | 0 |
| P10 | -28,5 | 28,5 | 0 | P25 | 3,2 | 3,2 | 0 | P37 | 22 | 23,5 | 0 |
| P11 | 28,5 | 28,5 | 0 | P26 | 3,2 | -3,8 | 0 | P40 | -10,5 | 3,5 | 0 |
| P12 | 35,5 | 28,5 | 0 | P27 | -3,2 | -3,5 | 0 | P41 | 10,5 | 3,5 | 0 |
| - | - | - | - | - | - | - | 0 | P159 | 28,5 | 28,5 | 60 |

4.4. Účel a tvorba 1D elementů

Dalším krokem při vytváření plošného modelu je tvorba 1D elementů, které vznikají spojením jednotlivých hraničních bodů, jak je ukázáno na obrázku 12. Mezi 1D elementy patří např. úsečky, kružnice, oblouky, B-spline aj.



Obr.12 1D elementy koutového svaru - 2D model (svar A_5)

Každý 1D element (v našem případě úsečka, označena písmenem L) má svou velikost, která je dána jeho hraničními body. Tyto elementy se následně rozdělují na menší dílky, kterými je definována velikost plošných elementů. Tomuto dělení se říká diskretizace a 1D element může být pomocí ní dělen na rovnoměrné, nebo nerovnoměrné úseky. V případě nerovnoměrné diskretizace je nutné definovat směr růstu úseků na 1D elementu (pořadí označení hraničních bodů). [10]

V tabulce 4 jsou uvedeny všechny 1D elementy svaru A₅ včetně pořadí označení hraničních bodů, ze kterých se jednotlivé 1D elementy skládají (směrový vektor je v tabulce modře zbarven).

Tab.4 1D elementy (svar A₅)

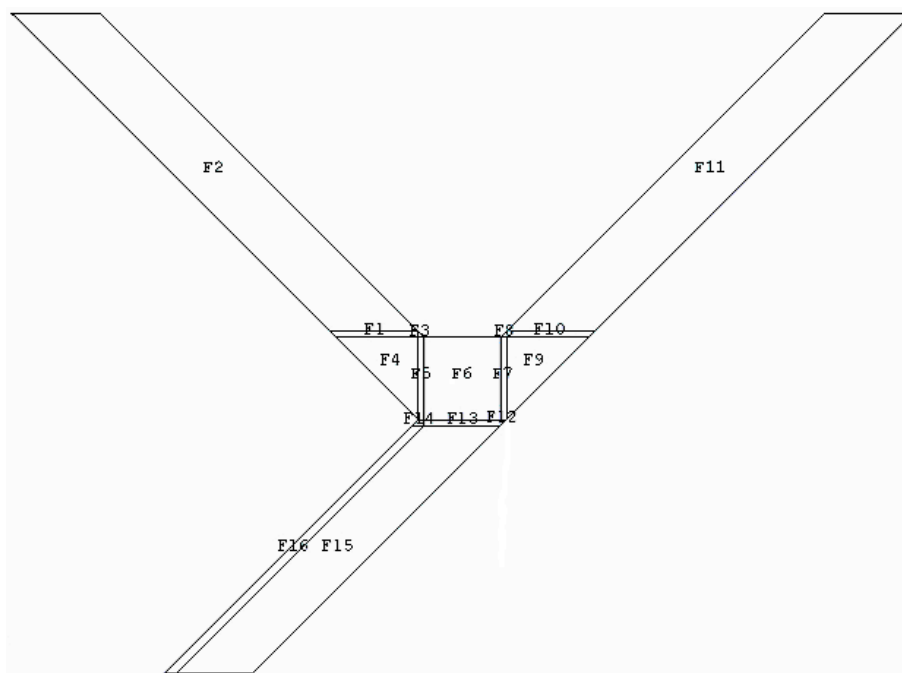
| Úsečky | Z bodu | Do bodu | Úsečky | Z bodu | Do bodu | Úsečky | Z bodu | Do bodu |
|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| L11 | P9 | P10 | L66 | P20 | P25 | L72 | P37 | P34 |
| L12 | P10 | P1 | L67 | P25 | P24 | L73 | P34 | P35 |
| L13 | P2 | P11 | L68 | P27 | P32 | L74 | P35 | P6 |
| L14 | P11 | P12 | L69 | P32 | P4 | L75 | P35 | P36 |
| L32 | P23 | P19 | L70 | P26 | P33 | L76 | P36 | P27 |
| L33 | P24 | P19 | L47 | P22 | P4 | L77 | P36 | P26 |
| L37 | P20 | P22 | L48 | P4 | P26 | L78 | P36 | P37 |
| L38 | P19 | P1 | L52 | P23 | P6 | L79 | P23 | P40 |
| L39 | P19 | P6 | L56 | P24 | P27 | L80 | P40 | P9 |
| L42 | P2 | P20 | L57 | P6 | P27 | L81 | P22 | P41 |
| L43 | P20 | P4 | L64 | P26 | P32 | L82 | P12 | P41 |
| L44 | P1 | P24 | L65 | P32 | P25 | L83 | P1 | P40 |
| L45 | P2 | P25 | L71 | P33 | P37 | L84 | P2 | P41 |
| - | - | - | - | - | - | L259 | P11 | P159 |

Tabulky s údaji o 1D elementech pro ostatní svary jsou uvedeny v příloze (svary A₁ – A₄ v tabulkách 17 – 20, svary A₆ a A₇ v tabulkách 21 a 22).

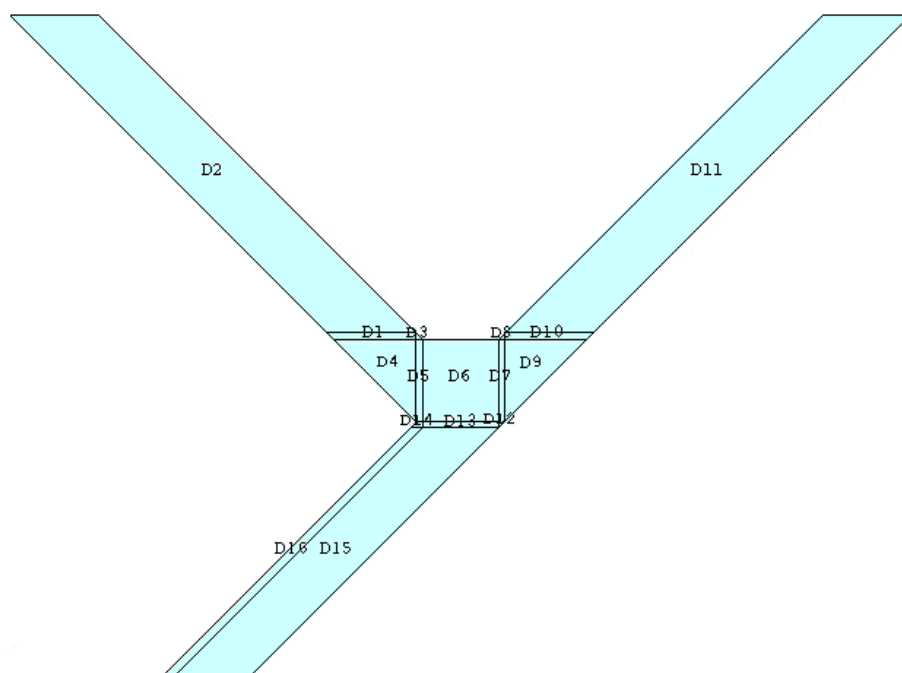
4.5. Edge a domény

Aby bylo možné koutový svar zasítovat, je zapotřebí vytvořit „edge“ a „domény“. Edge v podstatě reprezentují ohraničení jednotlivých oblastí a jsou označeny písmenem F. Jak je zřejmé z obrázku 13a. Jedná se o rám, který je složen z 1D elementu. Právě „edge“ rozhodují (díky diskretizaci 1D elementů) o tom, jak hustá bude síť plošných elementů a uzlových bodů.

Domény jsou pak plošné oblasti ohraničené „edgemi“ a značí se písmenem D. Pomocí domén se z plošného modelu vytvoří model prostorový. Přitom každá „edge“ může (ale nemusí) být vytažena do prostoru podle libovolného směrového vektoru. Na obrázku 13b jsou zobrazeny plochy domén modře a pro naše plošné modely jsou totožné s „edgemi“. [10]



Obr.13a edge (svar A₅)



Obr.13b domény (svar A₅)

V tabulce 5 je uvedeno, z jakých 1D elementů jsou jednotlivé edge složeny a také popsáno, jaká doména se vytvořila z příslušné edge pro svar A_5 . Pro zlepšení přehlednosti je vhodné, když edge a domény mají stejná pořadová čísla. V přílohách jsou edge a domény uvedeny v tabulkách 23 – 26 pro svary A_1 – A_4 v tabulkách 27, 28 jsou uvedeny edge a domény pro svary A_6 , A_7 .

Tab.5 edge a domény (svar A_5)

| Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | | Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | |
|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|
| D1 | F1 | L79 | L83 | L38 | L32 | D9 | F9 | L37 | L42 | L84 | L81 |
| D2 | F2 | L83 | L80 | L11 | L12 | D10 | F10 | L84 | L82 | L14 | L13 |
| D3 | F3 | L38 | L33 | L44 | - | D11 | F11 | L69 | L48 | L64 | - |
| D4 | F4 | L32 | L52 | L39 | - | D12 | F12 | L76 | L77 | L64 | L68 |
| D5 | F5 | L56 | L68 | L67 | L65 | D13 | F13 | L57 | L74 | L75 | L76 |
| D6 | F6 | L42 | L45 | L66 | - | D14 | F14 | L70 | L71 | L77 | L78 |
| D7 | F7 | L65 | L45 | L43 | L69 | D15 | F15 | L72 | L73 | L75 | L78 |
| D8 | F8 | L43 | L47 | L37 | - | D16 | F16 | L56 | L57 | L39 | L33 |

4.6. Diskretizace a síťování 2D modelu

Pokud jsou vytvořeny edge a domény, je již možné začít diskretizovat 2D model. Jak bylo uvedeno v kapitole 4.4., pod pojmem diskretizace si je možné představit rozdělení vytvořených 1D elementů na řadu drobných úseků. 1D elementy můžeme rozdělit na libovolný počet dílků, přičemž výsledný rozměr dílku závisí na zvoleném počtu dílků a délce 1D elementu. Takto se rozdělí 1D elementy na úseky, které mají konstantní rozměr v celé své délce. [10]

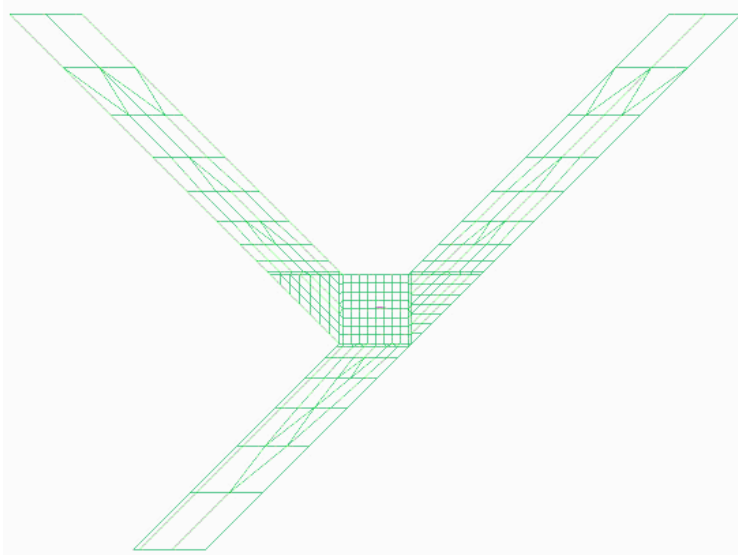
Jinou možností diskretizace je metoda, kdy je každý následný dílek dvojnásobkem dílků původního. V tomto případě je ale třeba hlídat orientaci 1D elementů, jak bylo zmíněno v kapitole 4.4. [10]

V tabulce 6 (platí pro svar A_5) je uvedeno, na kolik dílků je jednotlivý 1D element (úsečka) rozdělen a oranžově zbarvené 1D elementy jsou úsečky, které mají proměnnou délku dílku. V přílohách jsou uvedeny diskretizace 1D elementů pro ostatní modely svarů. V tabulkách 29 – 32 pro svary A_1 – A_4 a v tabulkách 33 a 34 pro svary A_6 a A_7 .

Tab.6 diskretizace - 2D model (svar A_5)

| Úsečky | Dělení | Úsečky | Dělení | Úsečky | Dělení | Úsečky | Dělení | Úsečky | Dělení |
|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| L11 | 2 dílky | L38 | 1 dílek | L52 | 7 dílků | L69 | 1 dílek | L77 | 6 dílků |
| L12 | 8 dílků | L39 | 7 dílků | L56 | 8 dílků | L70 | 6 dílků | L78 | 6 dílků |
| L13 | 8 dílků | L42 | 1 dílek | L57 | 1 dílek | L71 | 2 dílky | L79 | 1 dílek |
| L14 | 2 dílky | L43 | 7 dílků | L64 | 1 dílek | L72 | 1 dílek | L80 | 8 dílků |
| L32 | 7 dílků | L44 | 1 dílek | L65 | 8 dílků | L73 | 6 dílků | L81 | 1 dílek |
| L33 | 1 dílek | L45 | 1 dílek | L66 | 1 dílek | L74 | 1 dílek | L82 | 8 dílků |
| L37 | 7 dílků | L47 | 7 dílků | L67 | 8 dílků | L75 | 1 dílek | L83 | 6 dílků |
| - | - | L48 | 1 dílek | L68 | 8 dílků | L76 | 1 dílek | L84 | 6 dílků |

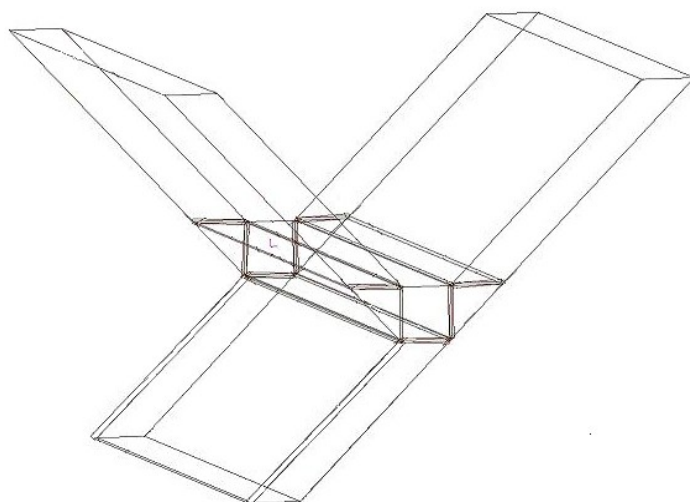
Jsou-li jednotlivé edge diskretizovány, je možné 2D model zasítovat, tak jak naznačuje obrázek 14 pro svar A_5 .



Obr.14 Zasítování 2D - model (svár A_5)

4.7.1. Vytvoření prostorového modelu

Doposud uvedeným postupem, byl vytvořen pouze plošný model koutového svaru a je zapotřebí jej vytáhnout do prostoru. Pro svar A_5 se udělá posunutí podle směrového vektoru, který je určen body P11 a P159. Po označení směrového vektoru jsou vybrány domény D1 – D16 a z těchto domén se vytvoří objemy o délce směrového vektoru a tvaru domén plošného modelu. Tím se z plošného modelu stane prostorový model, jak je ukázáno na obrázku 15 pro svar A_5 . [10]

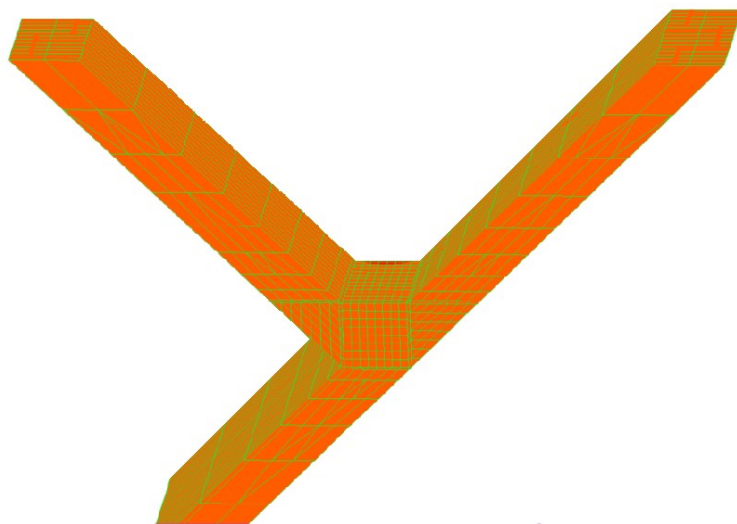


Obr.15 3D modelu (svar A_5)

4.7.2. Diskretizace a síťování 3D modelu

Po vytažení modelu do prostoru se udělá diskretizace jednotlivých objemů, aby mohly být definovány rozměry prostorových elementů. Postup je identický jako u diskretizace plošných modelů. U svarů A_4 , A_7 byly objemy diskretizovány na úseky dlouhé 1mm (tedy se rozdělí na 60 dílků) a u svarů A_1 , A_2 , A_3 , A_5 , A_6 na úseky dlouhé 1,5mm, zde se rozdělí na 40 dílků. [10]

Předtím, než se model prostorově zasítuje, je potřeba vymazat veškeré domény a edge. Takto se odstraní plošný model, který už není zapotřebí a v modelu zbudou pouze prostorové elementy. Následuje prostorové zasítování, které je zobrazeno na obrázku 16 pro svar A_5 . [10]



Obr.16 3D síť (svar A_5)

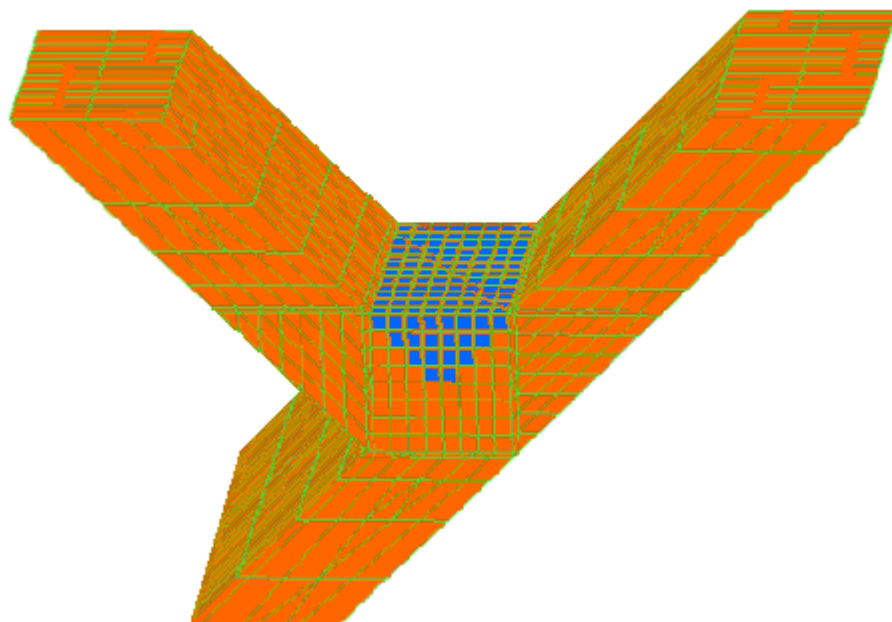
4.8 Vytvoření pomocných skupiny elementů a uzlových bodů

Po vytvoření 3D modelu je nutno ještě vytvořit pomocné skupiny elementů a uzlových bodů (obdobně jak bylo uvedeno v kapitole 4.1.). Zmíněné skupiny uzlových bodů vznikají pro konkrétní potřebu při výpočtu. V tomto případě stačilo pro výpočet modelu svaru rozdělit na dvě skupiny elementů.

První z pomocných skupin elementů je skupina definující plochu pro přestup tepla, nebo-li oblast základního materiálu (na obrázku 17 má oranžovou barvu). Pro přestup tepla je využita téměř celá obálka 3D modelu, mimo povrchu reprezentující svarovou housenku. [10]

Druhá pomocná skupina bodů jsou elementy reprezentující oblast svarového kovu (na obrázku 17 má tato oblast modrou barvu). Tato skupina je velice důležitá z hlediska postupného zapínání nebo vypínání elementů podle pohybu zdroje tepla.

Výpočtový model zahrnuje veškeré elementy housenky, ale výpočet se začíná uvažovat teprve ve chvíli, kdy elementy prochází zdroj tepla, respektive ve chvíli dodání přídavného materiálu. [10]

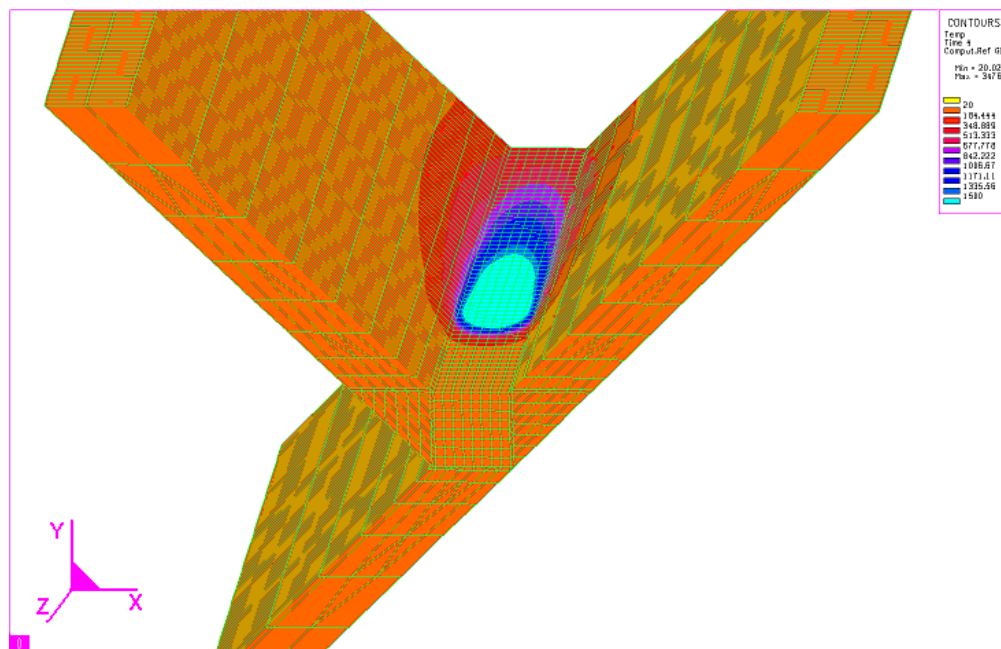


Obr.17 pomocné skupiny elementů

5. Simulace geometrie svarové lázně

V této chvíli jsou simulační modely připravené k vlastnímu výpočtu, ale než dojde ke spuštění simulace, musí se ještě určit poloha zdroje tepla na jednotlivých vzorcích. Data potřebná pro popis tepelného zdroje již byla zmíněna v kapitole 3.2.2. Pro určení polohy zdroje je nutno znát polohu svařování a definovat, v jaké rovině se tato poloha nachází při simulaci. U vytvořených modelů je to svařovací poloha PA. Poté se definuje umístění zdroje tepla v rovině XY, a v posledním kroku se podle rychlosti svařování nastavuje časový krok výpočtu tak, aby byl v daném časovém okamžiku zdroj tepla vždy v rovině uzlových bodů (ve směru osy Z) a zdroj tepla tak mohl být jednoznačně identifikován. Vzdálenost zdroje tepla na ose Z se stanoví podle rovnice (4), která je vysvětlena v kapitole 3.2.2. Na obrázku 18 je zobrazena poloha zdroje tepla ve svařovací poloze PA pro svar A_5 .

Když je určena poloha zdroje tepla, je možné zadat skutečný výkon zdroje tepla (ten se stanoví součinem efektivního proudu, efektivního napětí a účinnosti přenosu tepla - je uvedeno v tab. 1). Způsob výpočtu výkonu zdroje je popsán rovnicí (5) pro příklad použití u svaru A_5 . V tabulce 7 jsou za znamenaný hodnoty nutné k definování podmínek pro simulaci nemodifikovaného zdroje tepla a pozdější výpočet úpravy koeficientů.



Obr.18 poloha zdroje tepla pro svar A_5

Tab.7 určení polohy zdroje tepla, určení výkonu tepla

| Název svaru | Číslo svaru | Výkon P [W] | Účinnost zdroje tepla η | Skut. výkon P_s [W] | Svař. rychlost v_s [mm/s] | Počet kroku K | Vzdálenost zdroje tepla ξ [mm] |
|----------------|-------------|-------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------|------------------------------------|
| A ₁ | Sc058 | 5957,36 | 0,85 | 5063,76 | 3 | 12 | 36 |
| A ₂ | Sc059 | 5807,16 | 0,85 | 4936,09 | 4,5 | 9 | 40,5 |
| A ₃ | Sc060 | 5747,9 | 0,85 | 4885,72 | 6 | 7 | 42 |
| A ₄ | Sc061 | 5715,84 | 0,85 | 4858,46 | 8 | 5 | 40 |
| A ₅ | Sc062 | 5711,26 | 0,85 | 4854,57 | 10 | 4 | 40 |
| A ₆ | Sc063 | 5700 | 0,85 | 4845 | 12 | 3 | 36 |
| A ₇ | Sc064 | 5695,43 | 0,85 | 4841,12 | 13 | 3 | 39 |

Ukázka výpočtu výkonu zdroje tepla P_s [W]

$$P_s = (I_{ef} \cdot U_{ef}) \cdot \eta = (22,9 \cdot 249,4) \cdot 0,85 = 4854,57W \quad (5)$$

I_{ef} – efektivní proud [A]

U_{ef} – efektivní napětí [V]

η – účinnost zdroje tepla [-]

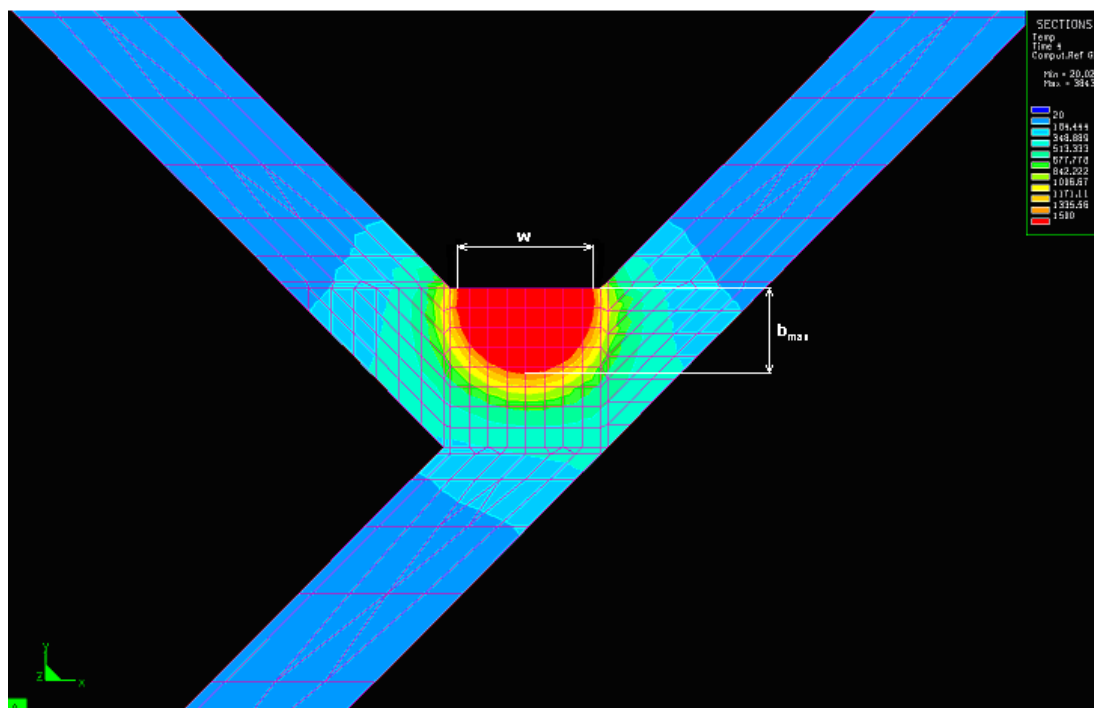
5.1. Simulace procesu svařování pro nemodifikovaný zdroj tepla

Poté, co se určí poloha zdroje tepla a stanoví skutečný výkon, je možné spustit výpočet. Zdroj tepla je popsán rovnicemi (1) a (2). To jsou rovnice pro hustotu tepelného toku do materiálu a jsou blíže vysvětleny v kapitole 3.2.2.1. Do rovnic se dosadí koeficienty k , l , $m = 3$, což jsou koeficienty nemodifikovaného zdroje tepla a jsou vhodné pro použití simulací pro ruční svařování obalenou elektrodou. Pro názornou ukázkou byly do rovnic (1) a (2) doplněny údaje ze svaru A₅. Výsledkem jsou rovnice (6) a (7). Provedenou simulací se zjistilo, že se rozměry natavené oblasti spočítané nemodifikovaným zdrojem, liší od reálných rozměrů svarové lázně (viz tabulka 8).

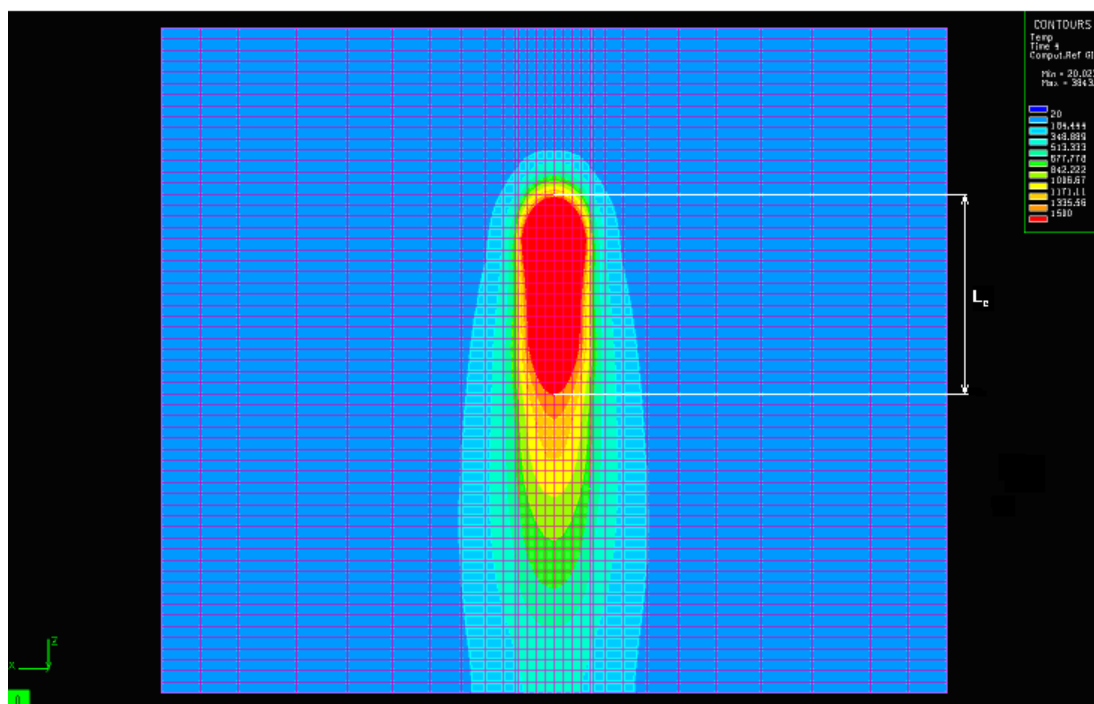
$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,8 \cdot 4854,57}{\frac{3,04}{2} \cdot 3,84 \cdot 12,18 \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{3,04^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{3,84^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{12,18^2}} \quad (6)$$

$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,2 \cdot 4854,57}{\frac{3,04}{2} \cdot 3,84 \cdot 4,16 \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{3,04^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{3,84^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{4,16^2}} \quad (7)$$

Grafické provedení simulace pomocí nemodifikovaného zdroje tepla je ukázáno na obrázcích 19a, 19b. Z nich je patrné, že v simulaci nevyhovuje žádný z rozměrů w , b_{\max} , l_c , vzhledem ke skutečné geometrii svarové lázně. Zjištěné rozdíly jednotlivých geometrických parametrů od svaru A_5 jsou $w = 0,4\text{mm}$, $b_{\max} = 0,5\text{mm}$, $l_c = 1,78\text{mm}$.



Obr.19a Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka svaru pro vzorek A_5



Obr. 19b Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A₅

Proto se musí upravit koeficienty k , l , m tak, aby vyhovovala geometrie nasimulovaného svaru reálným rozměrům. V tabulce 8 jsou pro porovnání zapsány rozměry získané pomocí nemodifikovaného zdroje tepla a geometrické rozměry reálných svarů. V přílohách jsou na obrázcích 25 – 28 uvedeny výsledky simulací natavené oblasti s nemodifikovaným modelem zdroje tepla pro svary A₁ – A₄ a na obrázcích 29, 30 pro svary A₆, A₇.

Tab. 8 rozměry nemodifikovaného zdroje tepla a reálných svarů

| Nemodifikované rozměry | w [mm] | b _{max} [mm] | l _c [mm] | Reálné rozměry | w [mm] | b _{max} [mm] | l _c [mm] |
|------------------------|--------|-----------------------|---------------------|----------------|--------|-----------------------|---------------------|
| A ₁ | 5,01 | 6,39 | 24,42 | A ₁ | 5,77 | 7,31 | 22,82 |
| A ₂ | 3,91 | 4,73 | 22,26 | A ₂ | 4,77 | 5,89 | 20,94 |
| A ₃ | 3,72 | 4,21 | 21,74 | A ₃ | 4,19 | 5,34 | 19,11 |
| A ₄ | 3,24 | 3,98 | 19,25 | A ₄ | 3,74 | 4,46 | 17,89 |
| A ₅ | 3,04 | 3,84 | 16,34 | A ₅ | 3,44 | 4,34 | 18,12 |
| A ₆ | 2,894 | 3,707 | 18,54 | A ₆ | 3,05 | 3,98 | 17,81 |
| A ₇ | 2,849 | 3,641 | 17,25 | A ₇ | 2,78 | 3,51 | 17,25 |

5.2. Program pracující na úpravě koeficientů k, l, m

Program vznikl díky projektu GAČR 101/09/P176 a pracuje na principu simplexní metody a hledá minimum funkce (snaží se tedy upravit koeficienty k, l, m tak, aby se co nejvíce přiblížily rozměrům odečteným na reálných svarech). Díky tomu se přepočítají rozměry w, b_{\max}, l_c u simulací protavené oblasti. Posloupnost kroků je následující:

- 1) Po zadání všech potřebných parametrů do zdrojového programu (skutečná geometrie svarové lázně, údaje potřebné k definování rovnic (1) a (2), teplota tavení materiálu a prvotní návrh koeficientů k, l, m).
- 2) Program spustí simulaci výpočtu teplotního pole v programu Sysweld a po ukončení výpočtu nechá vypsát teploty ve všech uzlových bodech modelu.
- 3) Následně jsou od definované polohy zdroje tepla ve směru os $X, Y, +Z$ a $-Z$ kontrolovány hodnoty teploty v příslušných uzlových bodech. Díky tomu mohou být definovány přesné hodnoty natavených oblastí ve směru jednotlivých os.
- 4) Zjištěné údaje se porovnají s reálnými rozměry a na základě velikosti odchylky na jednotlivých osách program navrhne úpravu koeficientů k, l, m .
- 5) Tato posloupnost se opakuje do doby, než se hodnoty natavené oblasti shodují s dostatečnou (definovanou) přesností s rozměry reálnými.

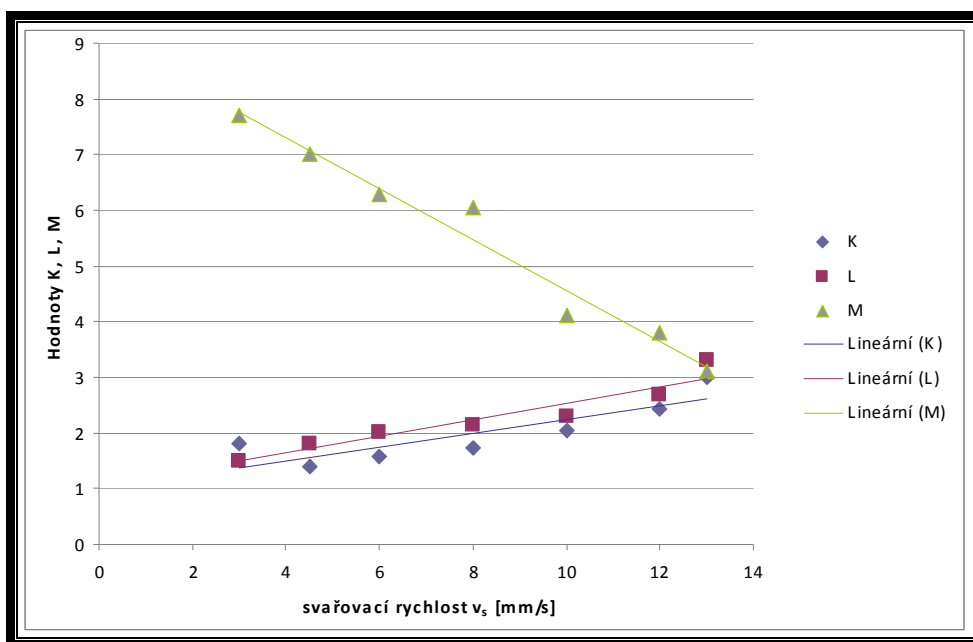
Jak předchozí řádky naznačují, tato metoda může být značně zdlouhavá. Proto bylo snahou zjistit, jestli nelze zjistit závislost změny koeficientů k, l, m při změně jednoho z procesních parametrů svařování (v našem případě rychlosti svařování).

V tabulce 9 jsou uvedeny modifikované koeficienty k , l , m a rozměry w , b_{\max} , l_c zjištěné simplexovou metodou.

Tab.9 koeficienty k , l , m a rozměry w , b_{\max} , l_c pro modifikovanou simulaci

| Název svaru | k | L | m | Název svaru | Šířka svaru w [mm] | Hloubka svaru b_{\max} [mm] | Délka svaru l_c [mm] |
|-------------|------|------|------|-------------|----------------------|-------------------------------|------------------------|
| A_1 | 1,8 | 1,5 | 7,7 | A_1 | 5,72 | 7,38 | 23,94 |
| A_2 | 1,4 | 1,8 | 7 | A_2 | 4,81 | 5,87 | 20,92 |
| A_3 | 1,57 | 2,01 | 6,28 | A_3 | 4,21 | 5,23 | 20,57 |
| A_4 | 1,73 | 2,14 | 6,05 | A_4 | 3,74 | 4,47 | 17,69 |
| A_5 | 2,05 | 2,3 | 4,1 | A_5 | 3,43 | 4,376 | 18,58 |
| A_6 | 2,44 | 2,69 | 3,8 | A_6 | 3,02 | 3,86 | 18,36 |
| A_7 | 3 | 3,3 | 3,1 | A_7 | 2,78 | 3,49 | 18,86 |

Z tabulky 9 je znát určitá progrese jednotlivých koeficientů k , l , m . Proto byla zjišťována změna jednotlivých koeficientů v závislosti na změně rychlosti svařování. Z grafu 1 je zřejmé, že při změně parametru rychlosti svařování je možné měnit koeficienty k , l , m s dostatečnou přesností podle lineárních závislostí.

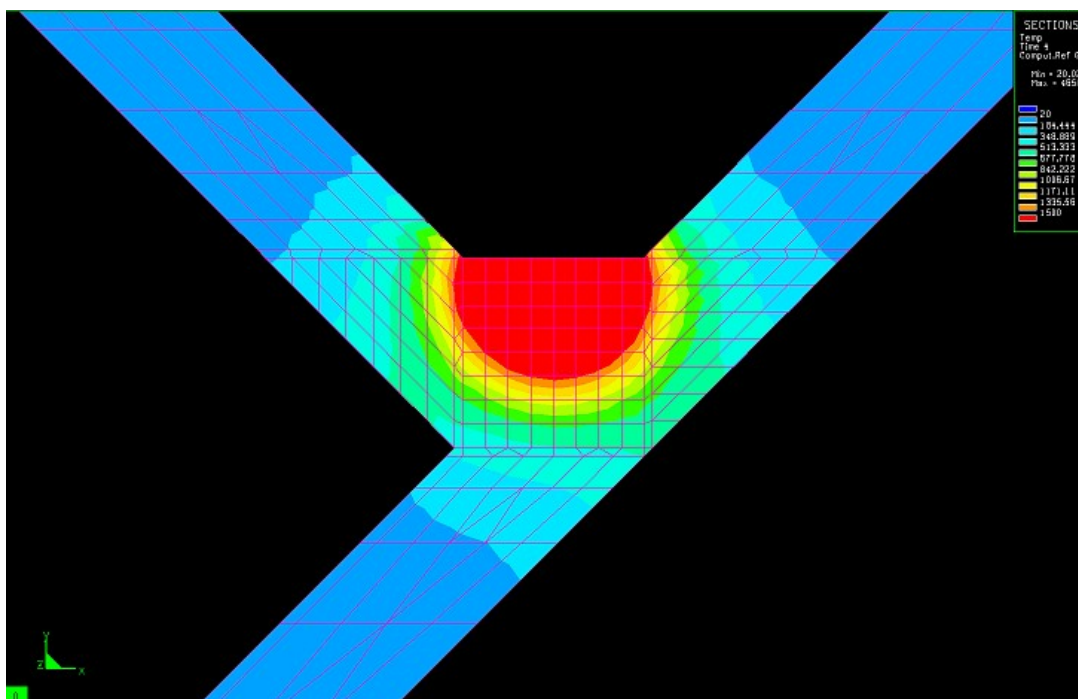


Graf 1. lineární funkce mezi koeficienty k , l , m v závislosti na rychlosti svařování

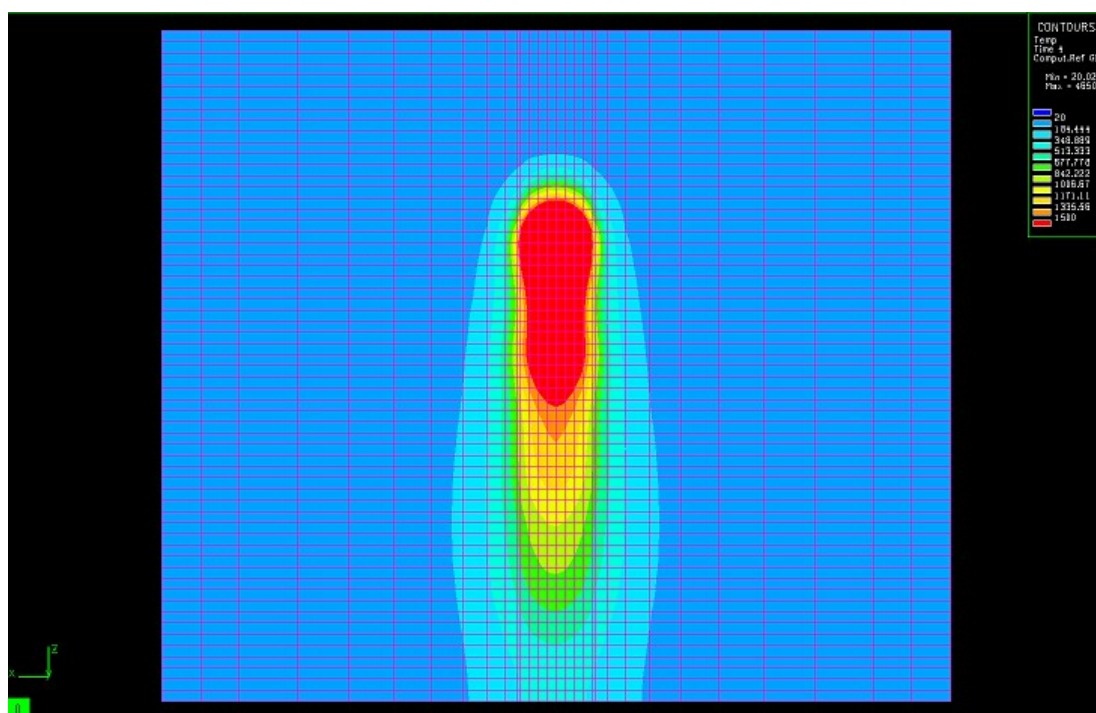
V tabulce 10 jsou uvedeny porovnávané geometrické parametry svarové lázně získané pomocí nových koeficientů k , l , m a geometrických parametrů získaných na reálných svarech. Z tabulky je zřejmé, že velká shoda panuje především u šířky a hloubky svarové lázně. Na obrázcích 20a, 20b je zobrazena natavená oblast od modifikovaného zdroje tepla pro model svaru A_5 . V příloze jsou uvedeny obrázky teplotního pole od modifikované zdroje tepla. Pro svary $A_1 - A_4$ to jsou obrázky 31 až 34, pro svary A_6 a A_7 jsou to obrázky 35 a 36.

Tab. 10 rozměry modifikovaného zdroje tepla a reálných svarů

| Modifikované rozměry | Šířka svaru w [mm] | Hloubka svaru b_{\max} [mm] | Délka svaru l_c [mm] | Reálné rozměry | Šířka svaru w [mm] | Hloubka svaru b_{\max} [mm] | Délka svaru l_c [mm] |
|----------------------|----------------------|-------------------------------|------------------------|----------------|----------------------|-------------------------------|------------------------|
| A_1 | 5,72 | 7,38 | 23,94 | A_1 | 5,77 | 7,31 | 22,82 |
| A_2 | 4,81 | 5,87 | 20,92 | A_2 | 4,77 | 5,89 | 20,94 |
| A_3 | 4,21 | 5,23 | 20,57 | A_3 | 4,19 | 5,34 | 19,11 |
| A_4 | 3,74 | 4,47 | 17,69 | A_4 | 3,74 | 4,46 | 17,89 |
| A_5 | 3,43 | 4,376 | 18,58 | A_5 | 3,44 | 4,34 | 18,12 |
| A_6 | 3,02 | 3,86 | 18,36 | A_6 | 3,05 | 3,98 | 17,81 |
| A_7 | 2,78 | 3,49 | 18,86 | A_7 | 2,78 | 3,51 | 17,25 |



Obr.20a Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A_5



Obr.20b Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A_5

6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zjistit, zda a případně jakým způsobem se mění matematický popis modelu zdroje tepla při svařování se stejně nastaveným svařovacím proudem, ale s rozdílnou rychlostí svařování. Při řešení práce se vycházelo z reálně provedených experimentů svařování, metodou 135 podle ČSN ISO 4063, řešených v jiné bakalářské práci. Procesní parametry, které byly při simulacích použity, jsou uvedeny v tabulce 1 geometrické údaje těchto reálných svarů jsou uvedeny v tabulce 2.

Dále bylo cílem seznámit se se simulačním programem Sysweld, včetně jeho modulů, navrhnout a popsat tvorbu 3D modelů koutových svarů odpovídajících reálným svarům. Na těchto modelech provést simulaci svařování s nemodifikovaným dvouelipsoidním modelem zdroje tepla a s využitím simplexní metody provést jeho modifikaci. Jak již bylo uvedeno v textu kapitoly 5, nemodifikovaný model zdroje tepla je vhodný především pro ruční svařování obalenou elektrodou, ale pro ostatní metody svařování se příliš nehodí.

V rámci předložené bakalářské práce bylo navrženo sedm 3D modelů koutových svarů, vytvořených pro simulace v programu Sysweld s podporou simplexní metody. V kapitolách 4.3. až 4.8. byla popsána tvorba modelu na konkrétním příkladu svaru A_5 od návrhu oblastí, přes definování hraničních bodů, tvorbu edgeí a domén až po diskretizaci a zasíťování plošného modelu. Dále byla popsána tvorba 3D modelu posunutím do prostoru a jeho zasíťování.

Stěžejní pro předkládanou práci ale bylo provedení vlastních simulací s nemodifikovaným modelem zdroje tepla a popis způsobu jeho modifikace s využitím simplexní metody. Modifikace modelu zdroje tepla pomocí této metody se skládala z následujících kroků:

- a) Zadání všech potřebných parametrů do zdrojového programu (skutečná geometrie svarové lázně, výkon zdroje, činnost přenosu tepla v oblouku, teplota tavení materiálu a prvotní návrh koeficientů k , l , m).
- b) Spuštění simulačního výpočtu v programu Sysweld a výpis teploty ve všech uzlových bodech modelu pro příslušný výpočetní čas.

- c) Definice polohy zdroje tepla pro příslušný výpočetní čas a definování přesné hodnoty natavených oblastí ve směru jednotlivých os.
- d) Porovnání zjištěných údajů s reálnými rozměry a návrh nových koeficientů k , l , m .
- e) Opakování posloupnosti do doby, než se hodnoty natavené oblasti shodují s dostatečnou (definovanou) přesností s rozměry reálnými. Získání modifikovaných koeficientů k , l , m .

Popsanou posloupností kroků byly zjištěny modifikované koeficienty k , l , m pro jednotlivé simulované svary A_1 až A_7 (tabulka 9). Dále bylo zjištěno, že mezi koeficienty k , l , m existuje funkční závislost na rychlosti svařování (kapitola 5.2.). Tato funkční závislost je pro jednotlivé koeficienty ukázána v grafu 1. Z grafu je zřejmé, že při změně parametru rychlosti svařování je možné měnit koeficienty k , l , m s dostatečnou přesností podle lineárních závislostí.

Je otázkou, zda bude možné takto získané závislosti využít i pro jiné hodnoty nastaveného svařovacího proudu a pro jiné typy ochranné atmosféry, protože při změně těchto parametrů se mohou změnit způsoby přenosu kovu v oblouku. To však již bude úkolem jiné práce.

7. Seznam použité literatury

[1] Dostupné z WWW: [cit. 1.9.2013]

[http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2011-](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2011-2_Historie%20tavn%C3%A9ho%20sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20kov%C5%AF%202011.pdf)

[2_Historie%20tavn%C3%A9ho%20sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20kov%C5%AF%202011.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2011-2_Historie%20tavn%C3%A9ho%20sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20kov%C5%AF%202011.pdf)

[2] NOVÁ, I., NOVÁKOVÁ, I., BARADÁČ, J.: *Technologie I, slévání a svařování*, Liberec 2006, ISBN 80-73772-052-3

[3] Dostupné z WWW: [cit. 5.9.2013]

http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AD10_prezetace.pdf

[4] Dostupné z WWW: [cit. 5.9.2013]

http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AD11_prezetace.pdf

[5] Dostupné z WWW: [cit. 20.9.2013]

http://cs.wikipedia.org/wiki/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD_v_ochrann%C3%A9_atmosf%C3%A9r%C3%A9_tavn%C3%ADc%C3%AD_se_elektrodou

[6] Dostupné z WWW: [cit. 20.9.2013]

<http://automig.cz/o-svarovani/metody/>

[7] MORAVEC, J.: *Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně, při svařování v ochranných atmosférách*, ISBN 978-80-7372-805-2, 2011.

[8] Dostupné z WWW: [cit. 20.10.2013]

<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/aktivity/sw.pdf>

[9] HAVELKA, P.: *Predikace tvaru a velikosti svarové lázně u metody 135(MAG)* [Diplomová práce]. Liberec 2010, TU v Liberci, FS

[10] MORAVEC, J.: *Analýza kritických míst programem MOVYPRO 07 na základě simulací v programu SYSWELD*, Liberec 2008, ISBN 978-80-7372-403-0.

[11] Sychra, M.: *Vliv svařovacích parametrů na geometrii svarové lázně při svařování MAG* [Diplomová práce]. Liberec 2010, TU v Liberci, FS

8. Seznam příloh

Přílohy č.1 – tabulky hraničních bodů pro modely svarů A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_6 , A_7

Přílohy č.2 – tabulky 1D elementů pro modely svarů A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_6 , A_7

Příloha č.4 – tabulky edge a domén pro svary A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_6 , A_7

Příloha č.5 – tabulky diskretizace 2D modelu pro svary A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_6 , A_7

Příloha č.6 – obrázky nemodifikovaných zdrojů tepla pro svary A_1 , A_2 , A_3 , A_4 ,
 A_6 , A_7

Příloha č.7 – obrázky modifikovaných zdrojů tepla pro svary A_1 , A_2 , A_3 , A_4 ,
 A_6 , A_7

Přílohy č.1

Tab.11 Hraniční body pro svar A₁

| Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z |
|------|-------|-------|---|------|-------|-------|---|------|------|------|----|
| P1 | -3,5 | 3,5 | 0 | P10 | -28,5 | 28,5 | 0 | P21 | -5,5 | 5,5 | 0 |
| P2 | 3,5 | 3,5 | 0 | P11 | 28,5 | 28,5 | 0 | P22 | 5,5 | 5,5 | 0 |
| P3 | 2,1 | 3,5 | 0 | P12 | 35,5 | 28,5 | 0 | P23 | 3,5 | 5,5 | 0 |
| P4 | 3,5 | -3,5 | 0 | P13 | 2,1 | -4,9 | 0 | P24 | -3,5 | 5,5 | 0 |
| P5 | 2,1 | -3,5 | 0 | P16 | -3,5 | -4,9 | 0 | P25 | 2,1 | 5,5 | 0 |
| P6 | -3,5 | -3,5 | 0 | P17 | -4,9 | -4,9 | 0 | P26 | 5,5 | -1,5 | 0 |
| P7 | -16,5 | -23,5 | 0 | P18 | -22 | -23,5 | 0 | P27 | -5,5 | -1,5 | 0 |
| P8 | -23,5 | -23,5 | 0 | P19 | -12,5 | 5,5 | 0 | P158 | 28,5 | 28,5 | 60 |
| P9 | -35,5 | 28,5 | 0 | P20 | 12,5 | 5,5 | 0 | - | - | - | - |

Tab.12 Hraniční body pro svar A₂

| Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z |
|------|-------|-------|---|------|-------|-------|---|------|------|------|----|
| P1 | -3,5 | 3,5 | 0 | P10 | -28,5 | 28,5 | 0 | P21 | 4,7 | 4,7 | 0 |
| P2 | 3,5 | 3,5 | 0 | P11 | 28,5 | 28,5 | 0 | P22 | -4,7 | 4,7 | 0 |
| P3 | 2,1 | 3,5 | 0 | P12 | 35,5 | 28,5 | 0 | P23 | 3,5 | 4,7 | 0 |
| P4 | 3,5 | -3,5 | 0 | P13 | 2,1 | -4,9 | 0 | P24 | -3,5 | 4,7 | 0 |
| P5 | 2,1 | -3,5 | 0 | P16 | -3,5 | -4,9 | 0 | P25 | 2,1 | 4,7 | 0 |
| P6 | -3,5 | -3,5 | 0 | P17 | -4,9 | -4,9 | 0 | P26 | 4,7 | 2,3 | 0 |
| P7 | -16,5 | -23,5 | 0 | P18 | -22 | -23,5 | 0 | P27 | -4,7 | 2,3 | 0 |
| P8 | -23,5 | -23,5 | 0 | P19 | 11,7 | 4,7 | 0 | P158 | 28,5 | 28,5 | 60 |
| P9 | -35,5 | 28,5 | 0 | P20 | -11,7 | 4,7 | 0 | - | - | - | - |

Tab.13 Hraniční body pro svar A₃

| Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z |
|------|-------|-------|---|------|-------|-------|---|------|------|------|----|
| P1 | -3,5 | 3,5 | 0 | P10 | -28,5 | 28,5 | 0 | P21 | 3,5 | 4 | 0 |
| P2 | 3,5 | 3,5 | 0 | P11 | 28,5 | 28,5 | 0 | P22 | 4 | 4 | 0 |
| P3 | 2,1 | 3,5 | 0 | P12 | 35,5 | 28,5 | 0 | P23 | -4 | 4 | 0 |
| P4 | 3,5 | -3,5 | 0 | P13 | 2,1 | -4,9 | 0 | P24 | -11 | 4 | 0 |
| P5 | 2,1 | -3,5 | 0 | P16 | -3,5 | -4,9 | 0 | P25 | 11 | 4 | 0 |
| P6 | -3,5 | -3,5 | 0 | P17 | -4,9 | -4,9 | 0 | P26 | -4 | -3 | 0 |
| P7 | -16,5 | -23,5 | 0 | P18 | -22 | -23,5 | 0 | P27 | 4 | -3 | 0 |
| P8 | -23,5 | -23,5 | 0 | P19 | -3,5 | 4 | 0 | P102 | 28,5 | 28,5 | 60 |
| P9 | -35,5 | 28,5 | 0 | P20 | 2,1 | 4 | 0 | - | - | - | - |

Tab.14 Hraniční body pro svar A₄

| Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z |
|------|------|------|---|------|-------|-------|---|------|-------|-------|----|
| P1 | -3,5 | 3,5 | 0 | P7 | -16,5 | -23,5 | 0 | P13 | 2,1 | -4,9 | 0 |
| P2 | 3,5 | 3,5 | 0 | P8 | -23,5 | -23,5 | 0 | P14 | 10,5 | -3,5 | 0 |
| P3 | 2,1 | 3,5 | 0 | P9 | -35,5 | 28,5 | 0 | P15 | 10,5 | -3,5 | 0 |
| P4 | 3,5 | -3,5 | 0 | P10 | -28,5 | 28,5 | 0 | P16 | -3,5 | -4,9 | 0 |
| P5 | 2,1 | -3,5 | 0 | P11 | 28,5 | 28,5 | 0 | P17 | -4,9 | -4,9 | 0 |
| P6 | -3,5 | -3,5 | 0 | P12 | 35,5 | 28,5 | 0 | P18 | -22,1 | -23,5 | 0 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | P96 | 28,5 | 28,5 | 60 |

Tab.15 Hraniční body pro svar A_6

| Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z |
|------|-------|-------|---|------|------|------|---|------|-------|------|----|
| P1 | -3,5 | 3,5 | 0 | P11 | 28,5 | 28,5 | 0 | P27 | -3 | -3,5 | 0 |
| P2 | 3,5 | 3,5 | 0 | P12 | 35,5 | 28,5 | 0 | P30 | 3 | -3,5 | 0 |
| P4 | 3,5 | -3,5 | 0 | P19 | -3,5 | 3 | 0 | P31 | 3 | -4 | 0 |
| P6 | -3,5 | -3,5 | 0 | P21 | 10 | 3 | 0 | P35 | -4 | -4 | 0 |
| P7 | -16,5 | -23,5 | 0 | P22 | -3 | 3 | 0 | P36 | -3 | -4 | 0 |
| P8 | -23,5 | -23,5 | 0 | P24 | 3,5 | 3 | 0 | P37 | 22 | 23,5 | 0 |
| P9 | -35,5 | 28,5 | 0 | P25 | 3 | 3 | 0 | P38 | 10,5 | -3,5 | 0 |
| P10 | -28,5 | 28,5 | 0 | P26 | 10 | 3 | 0 | P39 | -10,5 | -3,5 | 0 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | P161 | 28,5 | 28,5 | 60 |

Tab.16 Hraniční body pro svar A_7

| Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z | Body | X | Y | Z |
|------|-------|-------|---|------|------|------|---|------|-------|-------|----|
| P1 | -3,5 | 3,5 | 0 | P11 | 28,5 | 28,5 | 0 | P26 | -2,7 | -3,5 | 0 |
| P2 | 3,5 | 3,5 | 0 | P12 | 35,5 | 28,5 | 0 | P27 | 2,7 | -3,5 | 0 |
| P4 | 3,5 | -3,5 | 0 | P19 | -3,5 | 2,7 | 0 | P28 | 2,7 | -4,9 | 0 |
| P6 | -3,5 | -3,5 | 0 | P20 | -9,5 | 2,7 | 0 | P31 | -4,9 | -4,9 | 0 |
| P7 | -16,5 | -23,5 | 0 | P21 | -2,7 | 2,7 | 0 | P32 | -2,7 | -4,9 | 0 |
| P8 | -23,5 | -23,5 | 0 | P23 | 2,7 | 2,7 | 0 | P33 | 22 | -23,5 | 0 |
| P9 | -35,5 | 28,5 | 0 | P24 | 3,5 | 2,7 | 0 | P34 | 10,5 | 3,5 | 0 |
| P10 | -28,5 | 28,5 | 0 | P25 | 9,5 | 2,7 | 0 | P35 | -10,5 | 3,5 | 0 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | P95 | 28,5 | 28,5 | 60 |

Přílohy č.2

Tab.17 1D elementy pro svar A_1

| Úsečky | Z bodu do bodu | | Úsečky | Z bodu do bodu | | Úsečky | Z bodu do bodu | |
|--------|----------------|-----|--------|----------------|-----|--------|----------------|------|
| L1 | P1 | P3 | L28 | P13 | P16 | L42 | P1 | P21 |
| L2 | P2 | P3 | L29 | P16 | P17 | L43 | P21 | P27 |
| L3 | P1 | P6 | L30 | P6 | P16 | L44 | P22 | P26 |
| L4 | P6 | P5 | L31 | P16 | P18 | L45 | P4 | P26 |
| L5 | P5 | P4 | L32 | P20 | P21 | L46 | P26 | P19 |
| L6 | P2 | P4 | L33 | P21 | P24 | L47 | P6 | P27 |
| L11 | P9 | P10 | L34 | P24 | P25 | L48 | P27 | P20 |
| L14 | P11 | P12 | L35 | P25 | P23 | L49 | P20 | P9 |
| L16 | P4 | P13 | L36 | P23 | P22 | L50 | P21 | P10 |
| L17 | P13 | P7 | L37 | P22 | P19 | L51 | P19 | P12 |
| L18 | P3 | P5 | L38 | P1 | P24 | L52 | P22 | P11 |
| L19 | P5 | P13 | L39 | P3 | P25 | L53 | P6 | P17 |
| L26 | P7 | P18 | L40 | P2 | P23 | L54 | P17 | P8 |
| L27 | P18 | P8 | L41 | P2 | P22 | L258 | P11 | P158 |

Tab.18 1D elementy pro svar A_2

| Úsečky | Z bodu do bodu | | Úsečky | Z bodu do bodu | | Úsečky | Z bodu do bodu | |
|--------|----------------|-----|--------|----------------|-----|--------|----------------|------|
| L1 | P1 | P3 | L28 | P13 | P16 | L42 | P1 | P21 |
| L2 | P2 | P3 | L29 | P16 | P17 | L43 | P21 | P27 |
| L3 | P1 | P6 | L30 | P6 | P16 | L44 | P22 | P26 |
| L4 | P6 | P5 | L31 | P16 | P18 | L45 | P4 | P26 |
| L5 | P5 | P4 | L32 | P20 | P21 | L46 | P26 | P19 |
| L6 | P2 | P4 | L33 | P21 | P24 | L47 | P6 | P27 |
| L11 | P9 | P10 | L34 | P24 | P25 | L48 | P27 | P20 |
| L14 | P11 | P12 | L35 | P25 | P23 | L49 | P20 | P9 |
| L16 | P4 | P13 | L36 | P23 | P22 | L50 | P21 | P10 |
| L17 | P13 | P7 | L37 | P22 | P19 | L51 | P19 | P12 |
| L18 | P3 | P5 | L38 | P1 | P24 | L52 | P22 | P11 |
| L19 | P5 | P13 | L39 | P3 | P25 | L53 | P6 | P17 |
| L26 | P7 | P18 | L40 | P2 | P23 | L54 | P17 | P8 |
| L27 | P18 | P8 | L41 | P2 | P22 | L258 | P11 | P158 |

Tab.19 1D elementy pro svar A₃

| Úsečky | Z bodu do bodu | | Úsečky | Z bodu do bodu | | Úsečky | Z bodu do bodu | |
|--------|----------------|-----|--------|----------------|-----|--------|----------------|------|
| L1 | P1 | P3 | L28 | P13 | P16 | L42 | P24 | P26 |
| L2 | P2 | P3 | L29 | P16 | P17 | L43 | P26 | P6 |
| L3 | P1 | P6 | L30 | P6 | P16 | L44 | P21 | P2 |
| L4 | P6 | P5 | L31 | P16 | P18 | L45 | P12 | P25 |
| L5 | P5 | P4 | L32 | P24 | P23 | L46 | P25 | P27 |
| L6 | P2 | P4 | L33 | P23 | P19 | L47 | P27 | P4 |
| L11 | P9 | P10 | L34 | P19 | P20 | L48 | P22 | P11 |
| L14 | P11 | P12 | L35 | P20 | P21 | L49 | P22 | P27 |
| L16 | P4 | P13 | L36 | P21 | P22 | L50 | P23 | P26 |
| L17 | P13 | P7 | L37 | P22 | P25 | L51 | P2 | P22 |
| L18 | P3 | P5 | L38 | P10 | P23 | L52 | P1 | P2 |
| L19 | P5 | P13 | L39 | P19 | P1 | L53 | P6 | P17 |
| L26 | P7 | P18 | L40 | P20 | P3 | L54 | P17 | P8 |
| L27 | P18 | P8 | L41 | P9 | P24 | L132 | P11 | P102 |

 Tab.20 1D elementy pro svar A₄

| Úsečka | Z bodu do bodu | | Úsečka | Z bodu do bodu | | Úsečka | Z bodu do bodu | |
|--------|----------------|-----|--------|----------------|-----|--------|----------------|-----|
| L1 | P1 | P3 | L14 | P11 | P12 | L25 | P14 | P9 |
| L2 | P2 | P3 | L16 | P4 | P13 | L26 | P7 | P18 |
| L3 | P1 | P6 | L17 | P13 | P7 | L27 | P18 | P8 |
| L4 | P6 | P5 | L18 | P3 | P5 | L28 | P13 | P16 |
| L5 | P5 | P4 | L19 | P5 | P13 | L29 | P16 | P17 |
| L6 | P2 | P4 | L20 | P12 | P15 | L30 | P6 | P16 |
| L11 | P9 | P10 | L21 | P15 | P4 | L31 | P16 | P18 |
| L12 | P10 | P1 | L22 | P2 | P15 | L32 | P6 | P17 |
| L13 | P2 | P11 | L23 | P6 | P14 | L33 | P17 | P8 |
| | | | L24 | P1 | P14 | L145 | P11 | P96 |

 Tab.21 1D elementy pro svar A₆

| Úsečky | Z bodu do bodu | | Úsečky | Z bodu do bodu | | Úsečky | Z bodu do bodu | |
|--------|----------------|-----|--------|----------------|-----|--------|----------------|------|
| L11 | P9 | P10 | L46 | P4 | P31 | L72 | P35 | P6 |
| L12 | P10 | P1 | L48 | P31 | P30 | L73 | P27 | P36 |
| L13 | P2 | P11 | L50 | P30 | P4 | L74 | P36 | P35 |
| L14 | P11 | P12 | L53 | P6 | P27 | L76 | P36 | P31 |
| L32 | P21 | P19 | L55 | P6 | P21 | L77 | P8 | P37 |
| L33 | P19 | P22 | L56 | P6 | P19 | L78 | P37 | P7 |
| L36 | P25 | P24 | L57 | P22 | P27 | L79 | P37 | P36 |
| L37 | P24 | P2 | L60 | P24 | P4 | L80 | P26 | P39 |
| L38 | P2 | P25 | L61 | P30 | P25 | L81 | P39 | P12 |
| L40 | P1 | P19 | L66 | P22 | P25 | L82 | P21 | P38 |
| L41 | P22 | P1 | L67 | P27 | P30 | L83 | P38 | P9 |
| L44 | P24 | P26 | L68 | P31 | P7 | L84 | P2 | P39 |
| L45 | P26 | P4 | L71 | P8 | P35 | L85 | P1 | P38 |
| | | | | | | L273 | P11 | P161 |

Tab.22 1D elementy pro svár A₇

| Úsečky | Z bodu do bodu | | Úsečky | Z bodu do bodu | | Úsečky | Z bodu do bodu | |
|--------|----------------|-----|--------|----------------|-----|--------|----------------|-----|
| L11 | P9 | P10 | L44 | P24 | P2 | L68 | P33 | P8 |
| L12 | P10 | P1 | L45 | P2 | P23 | L69 | P8 | P31 |
| L13 | P2 | P11 | L46 | P24 | P25 | L70 | P31 | P6 |
| L14 | P11 | P12 | L47 | P25 | P4 | L71 | P26 | P32 |
| L32 | P6 | P26 | L48 | P4 | P27 | L72 | P32 | P33 |
| L33 | P26 | P21 | L50 | P27 | P28 | L73 | P31 | P32 |
| L34 | P21 | P19 | L51 | P28 | P4 | L74 | P32 | P28 |
| L35 | P19 | P1 | L55 | P27 | P23 | L75 | P25 | P34 |
| L36 | P1 | P21 | L56 | P24 | P4 | L76 | P2 | P34 |
| L37 | P6 | P19 | L64 | P21 | P2 | L77 | P34 | P12 |
| L38 | P19 | P20 | L65 | P26 | P27 | L78 | P1 | P35 |
| L39 | P6 | P20 | L66 | P28 | P7 | L79 | P20 | P35 |
| L43 | P23 | P24 | L67 | P7 | P33 | L80 | P35 | P9 |
| | | | | | | L112 | P11 | P95 |

Přílohy č.3

 Tab.23 edge a domény pro svar A_1

| Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | | Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | |
|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|
| D1 | F1 | L11 | L50 | L49 | L32 | D9 | F9 | L36 | L40 | L41 | - |
| D2 | F2 | L32 | L43 | L48 | - | D10 | F10 | L41 | L44 | L45 | L6 |
| D3 | F3 | L33 | L38 | L42 | - | D11 | F11 | L44 | L46 | L37 | - |
| D4 | F4 | L42 | L43 | L47 | L3 | D12 | F12 | L37 | L51 | L52 | L14 |
| D5 | F5 | L38 | L1 | L39 | L34 | D13 | F13 | L16 | L5 | L19 | - |
| D6 | F6 | L1 | L3 | L4 | L18 | D14 | F14 | L19 | L28 | L30 | L4 |
| D7 | F7 | L39 | L2 | L40 | L35 | D15 | F15 | L30 | L29 | L53 | - |
| D8 | F8 | L2 | L6 | L5 | L18 | D16 | F16 | L29 | L31 | L27 | L51 |
| - | - | - | - | - | - | D17 | F17 | L28 | L17 | L26 | L31 |

 Tab.24 edge a domény pro svar A_2

| Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | | Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | |
|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|
| D1 | F1 | L11 | L50 | L49 | L32 | D9 | F9 | L36 | L40 | L41 | - |
| D2 | F2 | L32 | L43 | L48 | - | D10 | F10 | L41 | L44 | L45 | L6 |
| D3 | F3 | L33 | L38 | L42 | - | D11 | F11 | L44 | L46 | L37 | - |
| D4 | F4 | L42 | L43 | L47 | L3 | D12 | F12 | L37 | L51 | L52 | L14 |
| D5 | F5 | L38 | L1 | L39 | L34 | D13 | F13 | L16 | L5 | L19 | - |
| D6 | F6 | L1 | L3 | L4 | L18 | D14 | F14 | L19 | L28 | L30 | L4 |
| D7 | F7 | L39 | L2 | L40 | L35 | D15 | F15 | L30 | L29 | L53 | - |
| D8 | F8 | L2 | L6 | L5 | L18 | D16 | F16 | L29 | L31 | L27 | L51 |
| - | - | - | - | - | - | D17 | F17 | L28 | L17 | L26 | L31 |

 Tab.25 edge a domény pro svar A_3

| Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | | Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | |
|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|
| D1 | F1 | L14 | L15 | L37 | L48 | D9 | F9 | L44 | L51 | L36 | - |
| D2 | F2 | L11 | L38 | L32 | L41 | D10 | F10 | L6 | L51 | L49 | L47 |
| D3 | F3 | L32 | L42 | L50 | - | D11 | F11 | L5 | L16 | L19 | - |
| D4 | F4 | L50 | L43 | L3 | L52 | D12 | F12 | L19 | L4 | L30 | L28 |
| D5 | F5 | L3 | L4 | L18 | L1 | D13 | F13 | L29 | L30 | L53 | - |
| D6 | F6 | L52 | L39 | L33 | - | D14 | F14 | L49 | L37 | L46 | - |
| D7 | F7 | L39 | L1 | L40 | L34 | D15 | F15 | L29 | L54 | L31 | L27 |
| D8 | F8 | L40 | L2 | L44 | L35 | D16 | F16 | L28 | L17 | L26 | L31 |
| - | - | - | - | - | - | D17 | F17 | L2 | L6 | L5 | L18 |

 Tab.26 edge a domény pro svar A_4

| Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | | Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | |
|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|
| D1 | F1 | L11 | L12 | L24 | L25 | D6 | F6 | L22 | L13 | L14 | L20 |
| D2 | F2 | L23 | L24 | L3 | - | D7 | F7 | L5 | L16 | L19 | - |
| D3 | F3 | L1 | L18 | L4 | L3 | D8 | F8 | L19 | L28 | L30 | L4 |
| D4 | F4 | L23 | L6 | L5 | L18 | D9 | F9 | L29 | L30 | L32 | - |
| D5 | F5 | L6 | L21 | L22 | - | D10 | F10 | L29 | L31 | L33 | L27 |
| - | - | - | - | - | - | D11 | F11 | L28 | L17 | L26 | L31 |

Tab.27 edge a domény pro svar A_6

| Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | | Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | |
|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|
| D1 | F1 | L82 | L85 | L40 | L32 | D9 | F9 | L60 | L44 | L45 | - |
| D2 | F2 | L85 | L83 | L12 | L11 | D10 | F10 | L37 | L44 | L80 | L84 |
| D3 | F3 | L40 | L41 | L33 | - | D11 | F11 | L84 | L81 | L14 | L13 |
| D4 | F4 | L32 | L56 | L55 | - | D12 | F12 | L46 | L48 | L50 | - |
| D5 | F5 | L33 | L56 | L53 | L57 | D13 | F13 | L48 | L76 | L73 | L67 |
| D6 | F6 | L57 | L66 | L67 | L61 | D14 | F14 | L72 | L73 | L74 | L53 |
| D7 | F7 | L61 | L50 | L60 | L36 | D15 | F15 | L76 | L68 | L78 | L79 |
| D8 | F8 | L36 | L37 | L38 | - | D16 | F16 | L77 | L79 | L71 | L74 |

Tab.28 edge a domény pro svar A_7

| Domény | Edge | složení z 1D elementů | | | | Domény | Edge | Složení z 1D elementů | | | |
|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|--------|------|-----------------------|-----|-----|-----|
| D1 | F1 | L79 | L78 | L35 | L38 | D9 | F9 | L33 | L65 | L55 | L64 |
| D2 | F2 | L44 | L46 | L75 | L76 | D10 | F10 | L43 | L56 | L48 | L55 |
| D3 | F3 | L34 | L35 | L36 | - | D11 | F11 | L46 | L47 | L46 | L56 |
| D4 | F4 | L78 | L80 | L11 | L12 | D12 | F12 | L48 | L50 | L51 | - |
| D5 | F5 | L43 | L44 | L45 | - | D13 | F13 | L50 | L74 | L71 | L65 |
| D6 | F6 | L76 | L77 | L13 | L14 | D14 | F14 | L71 | L32 | L70 | L73 |
| D7 | F7 | L37 | L38 | L39 | - | D15 | F15 | L74 | L72 | L66 | L67 |
| D8 | F8 | L32 | L33 | L34 | L37 | D16 | F16 | L73 | L72 | L68 | L69 |

Přílohy č.4

Tab.29 Diskretizace 2D modelu pro svar A₁

| Úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | Úsečky | rozdělení |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| L1 | 8 dílků | L28 | 8 dílků | L31 | 6 dílků | L39 | 3 dílky | L47 | 3 dílky |
| L2 | 2 dílky | L29 | 2 dílky | L32 | 10 dílků | L40 | 3 dílky | L48 | 10 dílků |
| L3 | 10 dílků | L30 | 2 dílky | L33 | 3 dílky | L41 | 3 dílky | L49 | 8 dílků |
| L4 | 8 dílků | L17 | 6 dílků | L34 | 8 dílků | L42 | 3 dílky | L50 | 8 dílků |
| L5 | 2 dílky | L18 | 10 dílků | L35 | 2 dílky | L43 | 10 dílků | L51 | 8 dílků |
| L6 | 10 dílků | L19 | 2 dílky | L36 | 3 dílky | L44 | 10 dílků | L52 | 8 dílků |
| L11 | 2 dílky | L26 | 2 dílky | L37 | 10 dílků | L45 | 3 dílky | L53 | 2 dílky |
| L14 | 2 dílky | L27 | 1 dílek | L38 | 3 dílky | L46 | 10 dílků | L54 | 6 dílků |
| L16 | 2 dílky | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tab.30 Diskretizace 2D modelu pro svar A₂

| Úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | Úsečky | rozdělení |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| L1 | 8 dílků | L17 | 6 dílků | L31 | 6 dílků | L39 | 3 dílky | L47 | 3 dílky |
| L2 | 2 dílky | L18 | 10 dílků | L32 | 10 dílků | L40 | 3 dílky | L48 | 10 dílků |
| L3 | 10 dílků | L19 | 2 dílky | L33 | 3 dílky | L41 | 3 dílky | L49 | 8 dílků |
| L4 | 8 dílků | L26 | 2 dílky | L34 | 8 dílků | L42 | 3 dílky | L50 | 8 dílků |
| L5 | 2 dílky | L27 | 1 dílek | L35 | 2 dílky | L43 | 10 dílků | L51 | 8 dílků |
| L6 | 10 dílků | L28 | 8 dílků | L36 | 3 dílky | L44 | 10 dílků | L52 | 8 dílků |
| L11 | 2 dílky | L29 | 2 dílky | L37 | 10 dílků | L45 | 3 dílky | L53 | 2 dílky |
| L14 | 2 dílky | L30 | 2 dílky | L38 | 3 dílky | L46 | 10 dílků | L54 | 6 dílků |
| L16 | 2 dílky | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tab.31 Diskretizace 2D modelu pro svar A₃

| Úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | Úsečky | rozdělení |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| L1 | 8dílků | L17 | 6 dílky | L31 | 6 dílků | L39 | 1 dílek | L47 | 2 dílky |
| L2 | 2 dílky | L18 | 10 dílků | L32 | 10 dílků | L40 | 1 dílek | L48 | 8 dílků |
| L3 | 10 dílků | L19 | 2 dílky | L33 | 1 dílek | L41 | 8 dílků | L49 | 10 dílků |
| L4 | 8 dílků | L26 | 2 dílky | L34 | 8 dílků | L42 | 10 dílků | L50 | 10 dílků |
| L5 | 2 dílky | L27 | 1 dílek | L35 | 2 dílky | L43 | 1 dílek | L51 | 1 dílek |
| L6 | 10 dílků | L28 | 8 dílků | L36 | 1 dílek | L44 | 1 dílek | L52 | 1 dílek |
| L11 | 2 dílky | L29 | 2 dílky | L37 | 10 dílků | L45 | 8 dílků | L53 | 2 dílky |
| L14 | 2 dílky | L30 | 2 dílky | L38 | 8 dílků | L46 | 10 dílků | L54 | 6 dílků |
| L16 | 2 dílky | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tab.32 Diskretizace 2D modelu pro svar A₄

| Úsečka | rozdělení | úsečka | rozdělení | úsečka | rozdělení | úsečka | rozdělení | Úsečka | rozdělení |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| L1 | 8dílků | L5 | 2dílky | L16 | 2dílky | L22 | 10dílků | L28 | 8dílků |
| L2 | 2dílky | L6 | 10dílků | L17 | 6dílků | L23 | 10dílků | L29 | 2dílky |
| L3 | 10dílků | L11 | 2dílky | L18 | 10dílků | L24 | 10dílků | L30 | 2dílky |
| L4 | 8dílků | L12 | 8dílků | L19 | 2dílky | L25 | 8dílků | L31 | 6dílků |
| - | - | L13 | 8dílků | L20 | 8dílků | L26 | 2dílky | L32 | 2dílky |
| - | - | L14 | 2dílky | L21 | 10dílků | L27 | 1dílek | L33 | 6dílků |

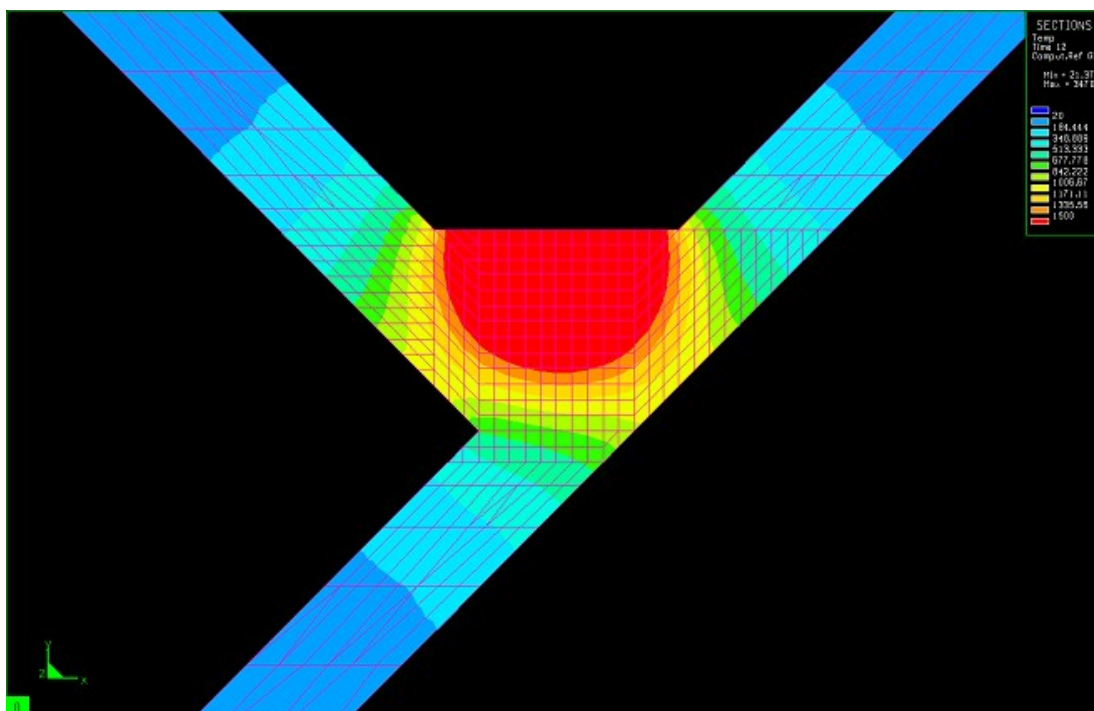
Tab.33 Diskretizace 2D modelu pro svar A₆

| Úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | Úsečky | rozdělení |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| L11 | 2 dílky | L37 | 1 dílek | L50 | 1 dílek | L67 | 10 dílků | L78 | 2 díleky |
| L12 | 8 dílků | L38 | 1 dílek | L53 | 1 dílek | L68 | 6 dílků | L79 | 6 dílků |
| L13 | 8 dílků | L40 | 1 dílek | L55 | 7 dílků | L71 | 6 dílků | L80 | 1 dílek |
| L14 | 2 dílky | L41 | 1 dílek | L56 | 7 dílků | L72 | 1 dílek | L81 | 8 dílků |
| L32 | 7 dílků | L44 | 7 dílků | L57 | 10 dílků | L73 | 1 dílek | L82 | 1 dílek |
| L33 | 1 dílek | L45 | 7 dílků | L60 | 7 dílků | L74 | 1 dílek | L83 | 8 dílků |
| L36 | 1 dílek | L46 | 1 dílek | L61 | 10 dílků | L76 | 6 dílků | L84 | 6 dílků |
| - | - | L48 | 1 dílek | L66 | 10 dílků | L77 | 1 dílek | L85 | 6 dílků |

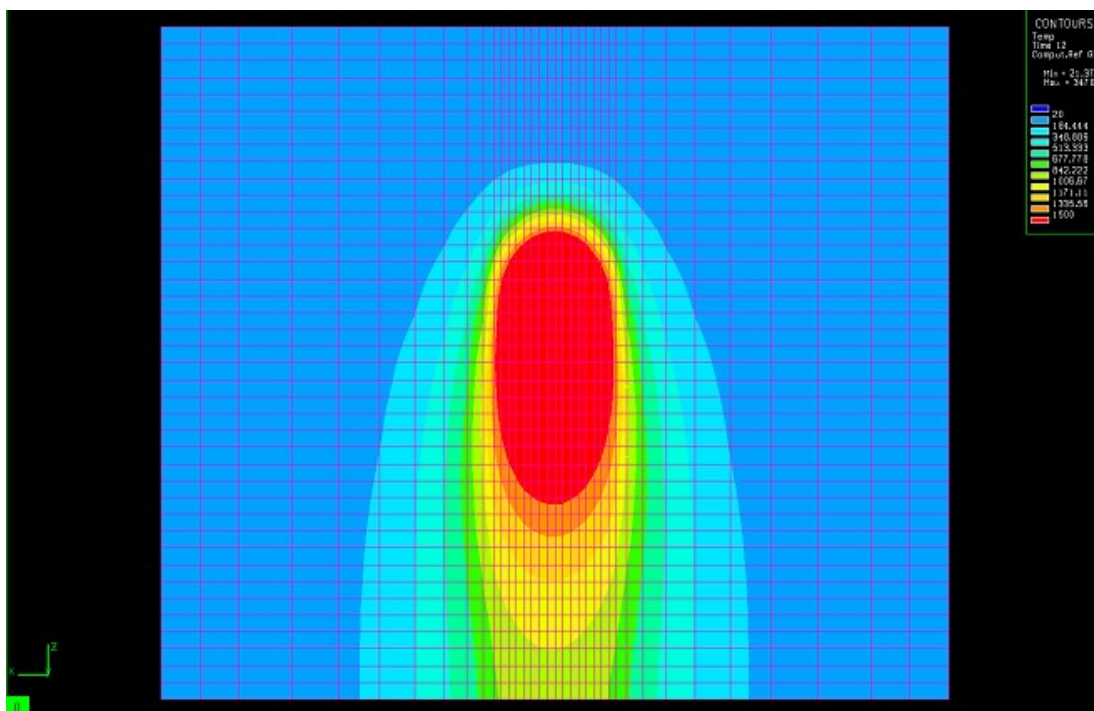
Tab.34 Diskretizace 2D modelu pro svar A₇

| Úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | úsečky | rozdělení | Úsečky | rozdělení |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| L11 | 2 dílky | L35 | 1 dílek | L46 | 6 dílků | L65 | 8 dílků | L73 | 1 dílek |
| L12 | 8 dílků | L36 | 1 dílek | L47 | 6 dílků | L66 | 6 dílků | L74 | 4 dílky |
| L13 | 8 dílků | L37 | 6 dílků | L48 | 1 dílek | L67 | 2 dílky | L75 | 1 dílek |
| L14 | 2 dílky | L38 | 6 dílků | L50 | 1 dílek | L68 | 1 dílek | L76 | 5 dílků |
| L32 | 1 dílek | L39 | 6 dílků | L51 | 1 dílek | L69 | 6 dílků | L77 | 8 dílků |
| L33 | 8 dílků | L43 | 1 dílek | L55 | 8 dílků | L70 | 1 dílek | L78 | 5 dílků |
| L34 | 1 dílek | L44 | 1 dílek | L56 | 6 dílků | L71 | 1 dílek | L79 | 1 dílek |
| - | - | L45 | 1 dílek | L64 | 8 dílků | L72 | 6 dílků | L80 | 8 dílků |

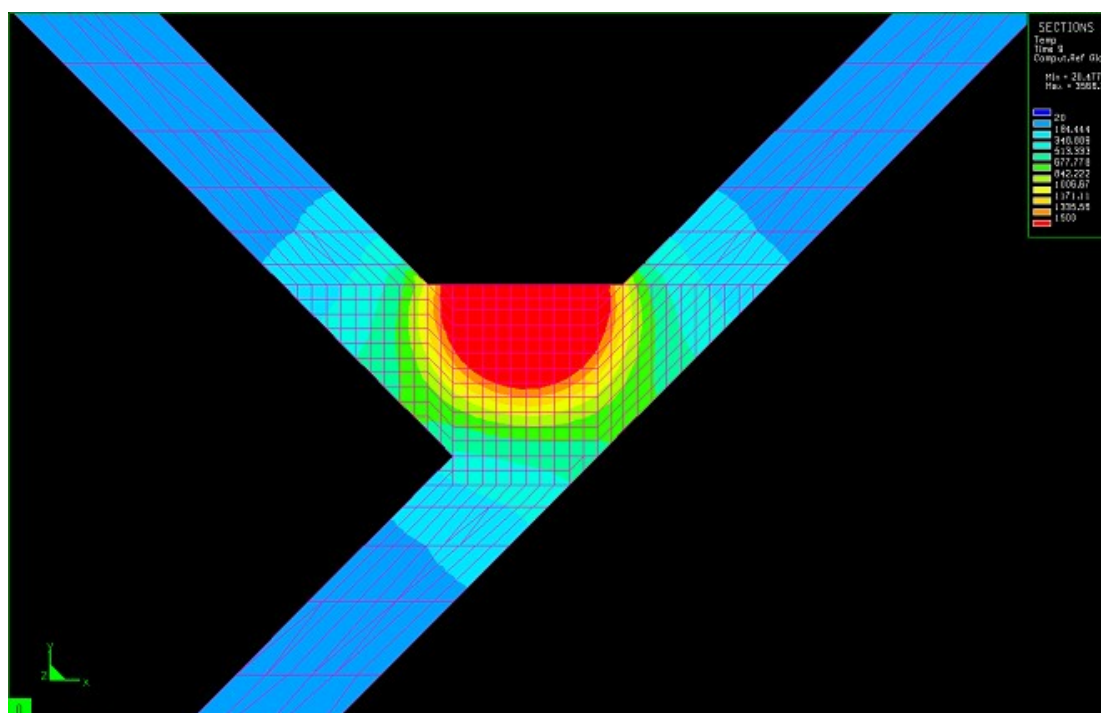
Přílohy č.5



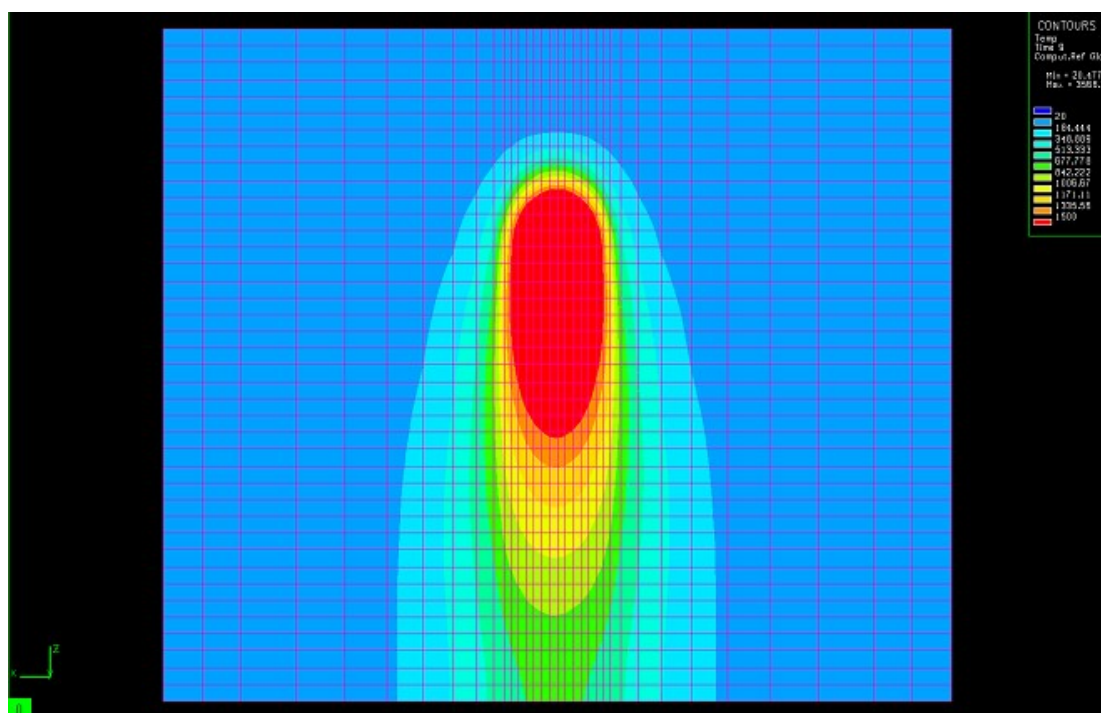
Obr.25a Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A_1



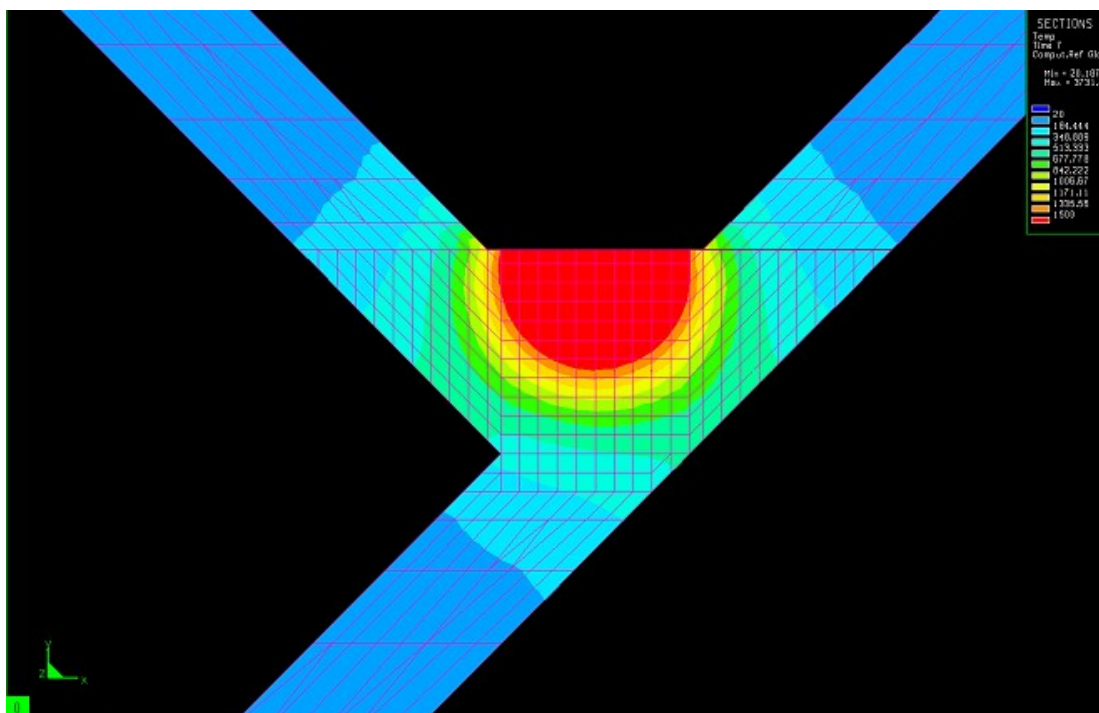
Obr.25b Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A_1



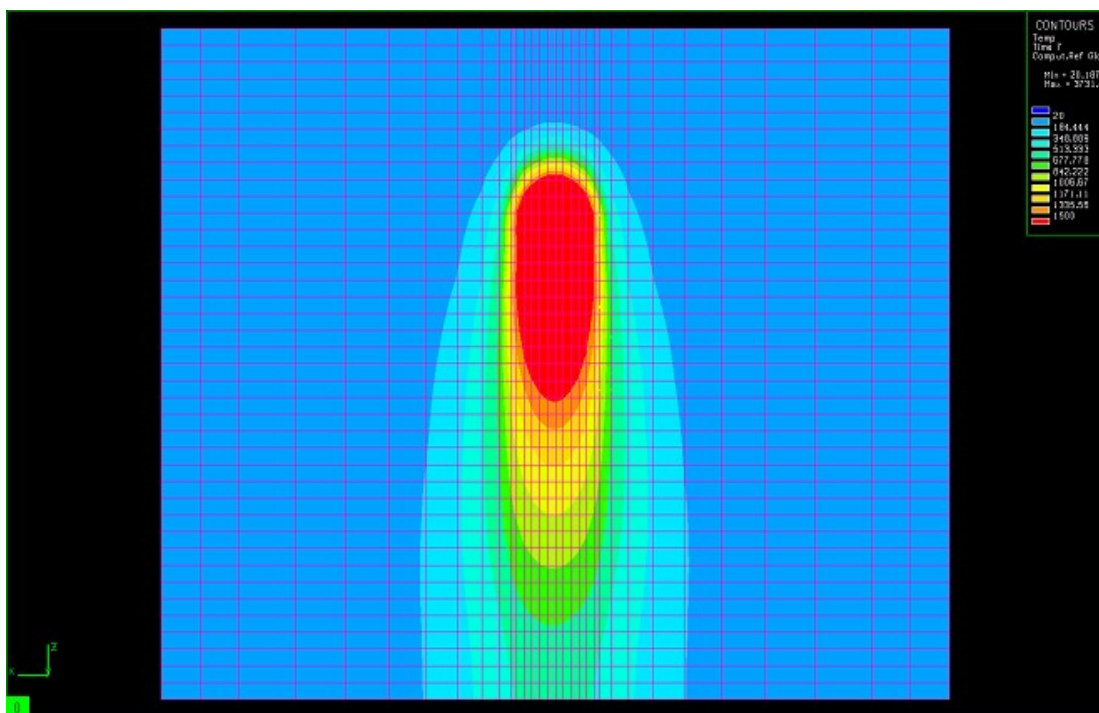
Obr.26a Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A_2



Obr.26b Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A_2



Obr.27a Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A_3



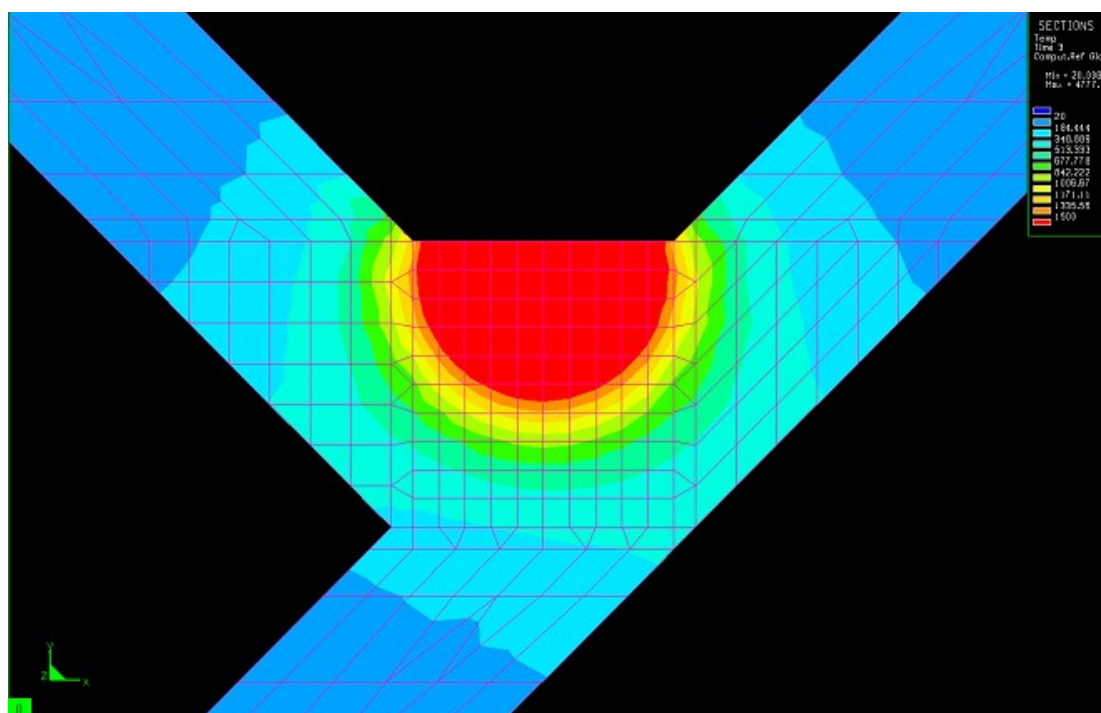
Obr.27b Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A_3



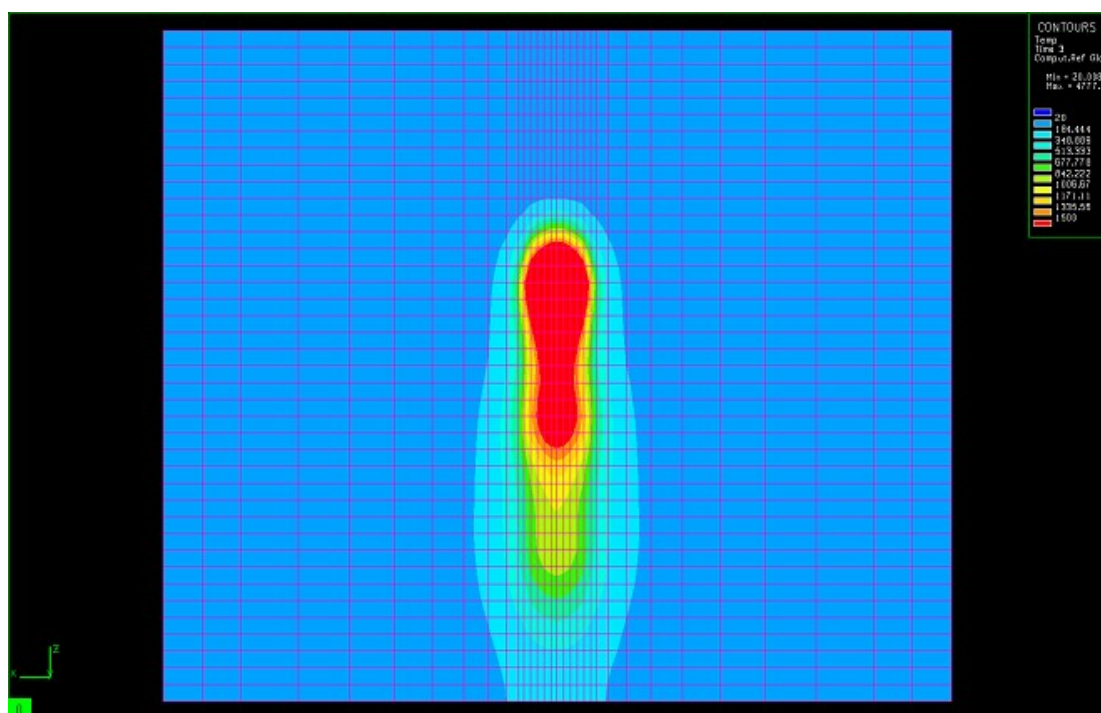
12



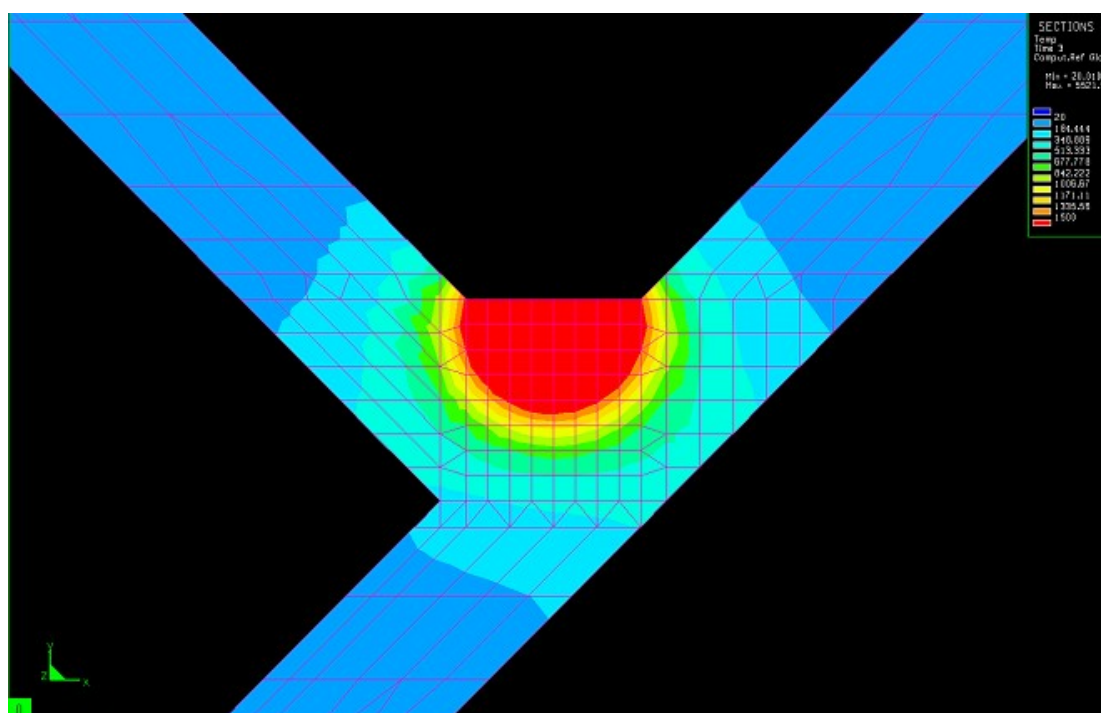
P



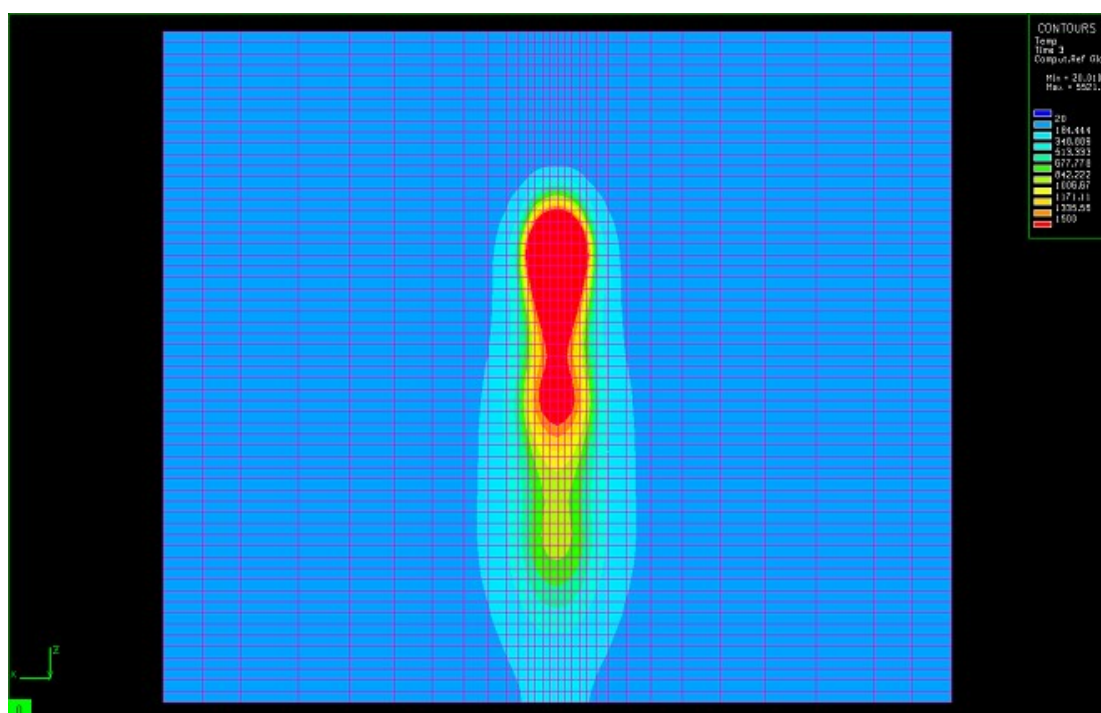
Obr.29a Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A₆



Obr.29b Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A₆

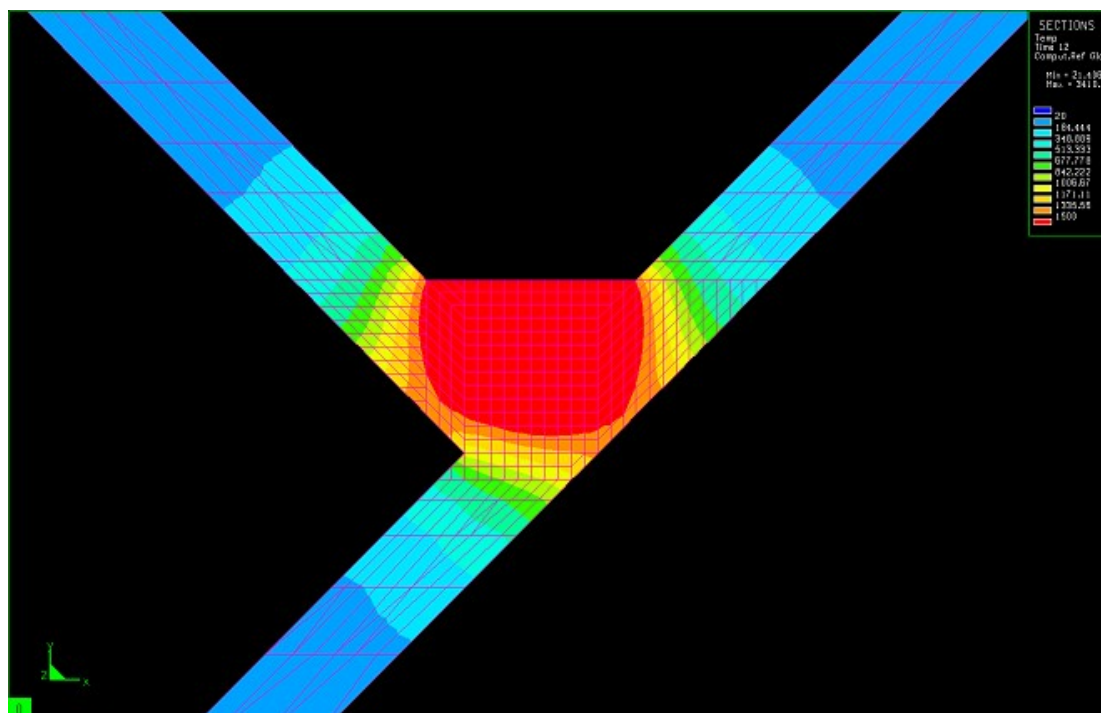


Obr.30a Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A₇

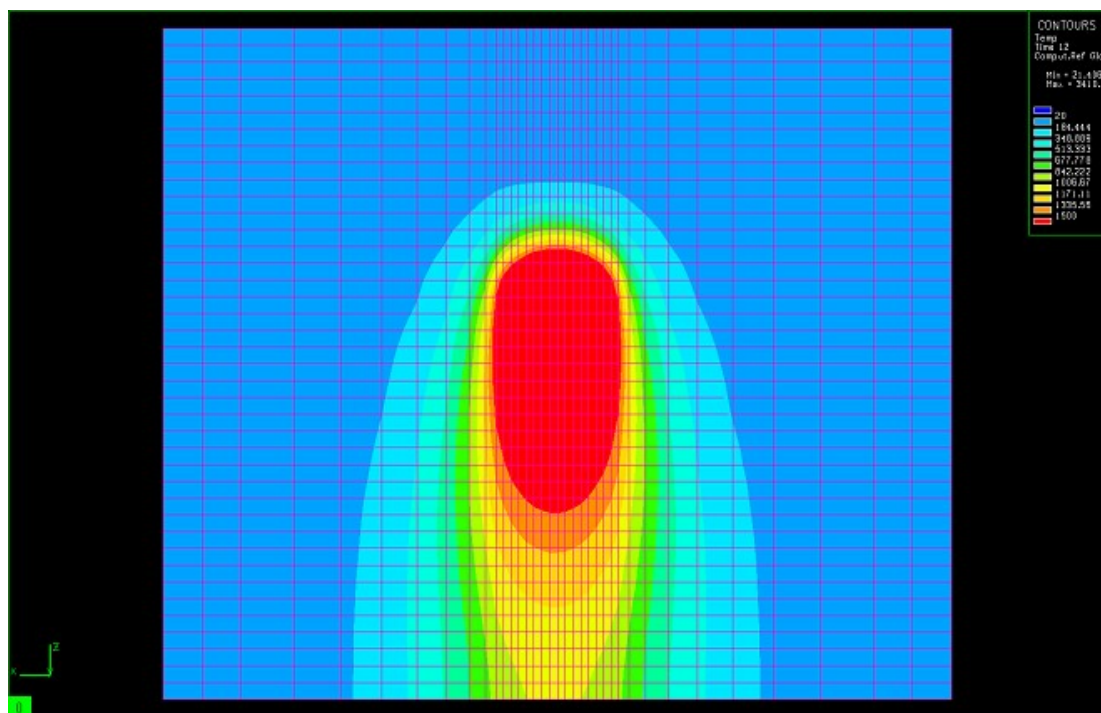


Obr.30b Nemodifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A₇

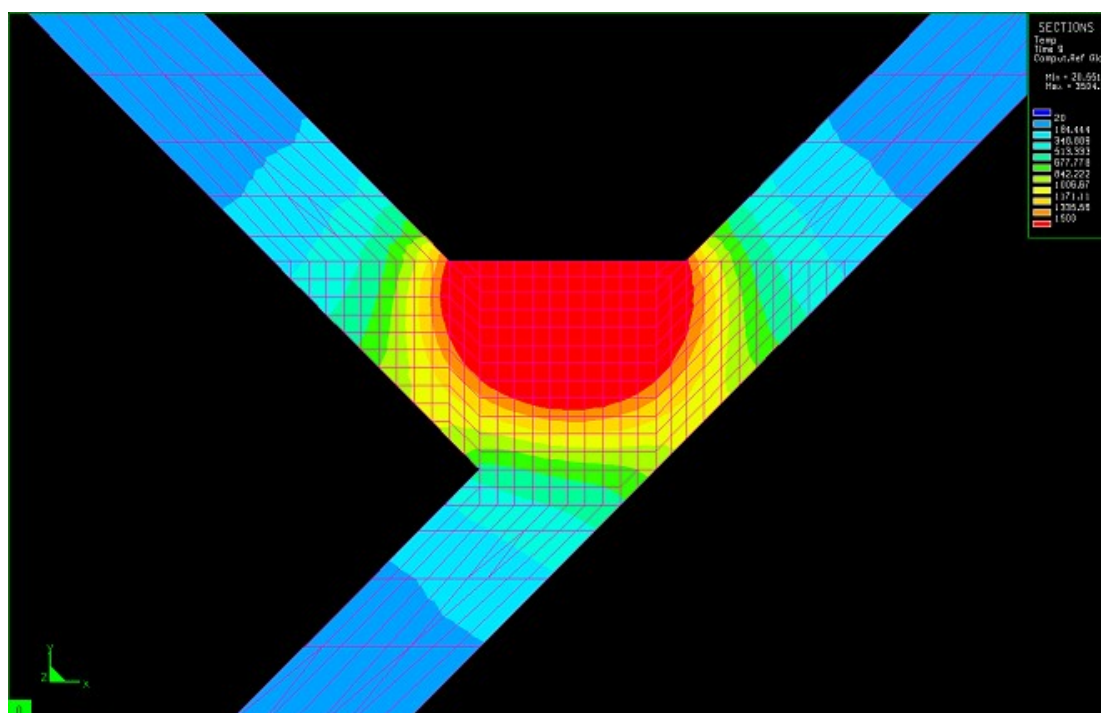
Přílohy č.6



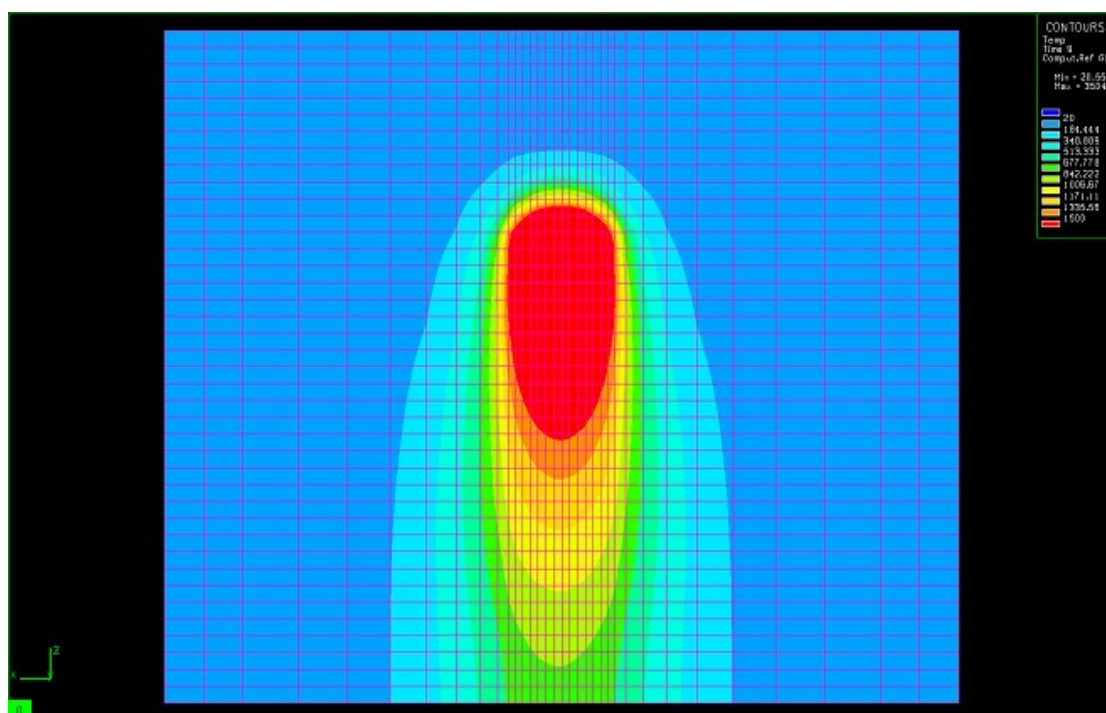
Obr.31a Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A_1



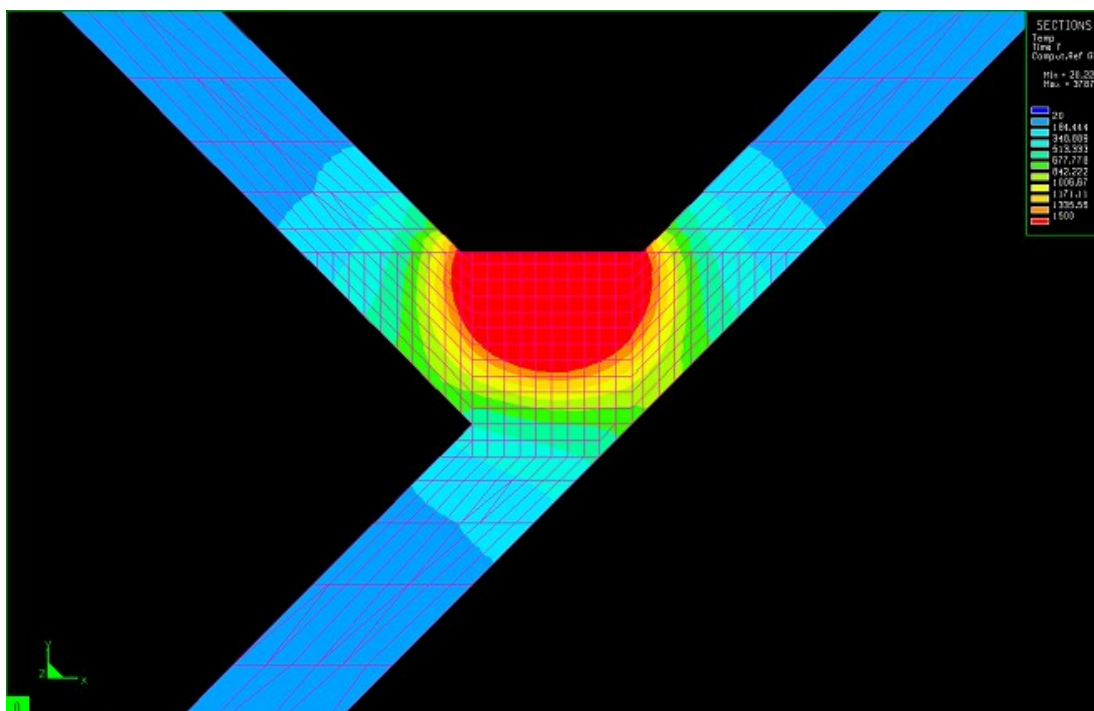
Obr.31b Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A_1



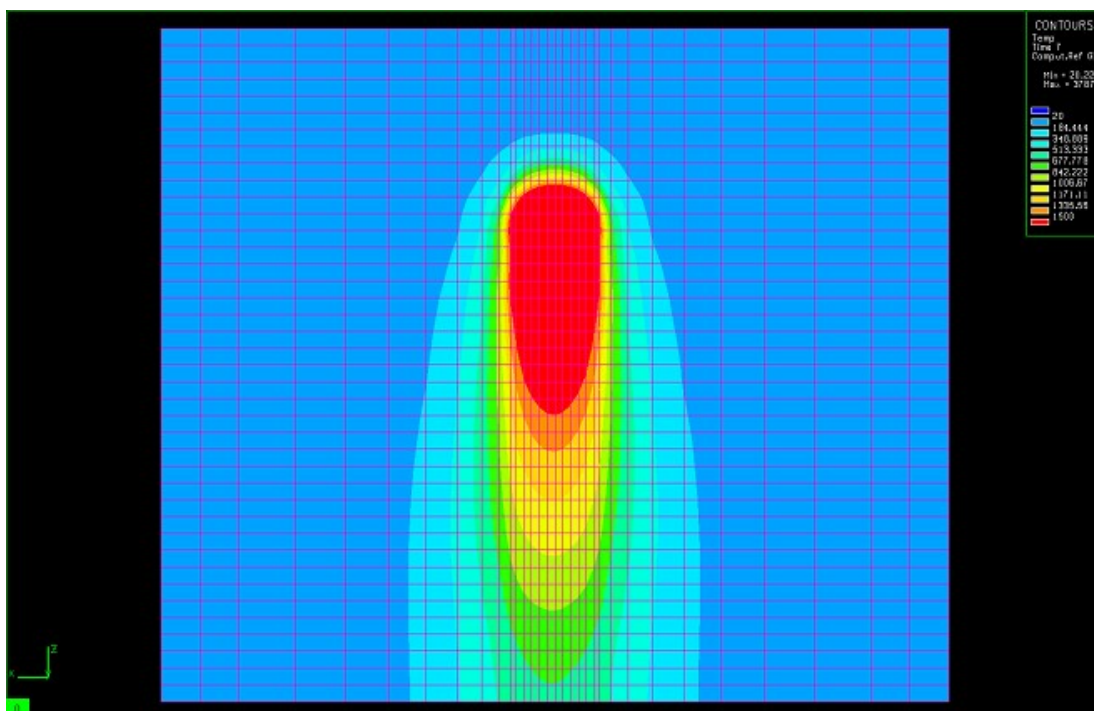
Obr.32a Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A_2



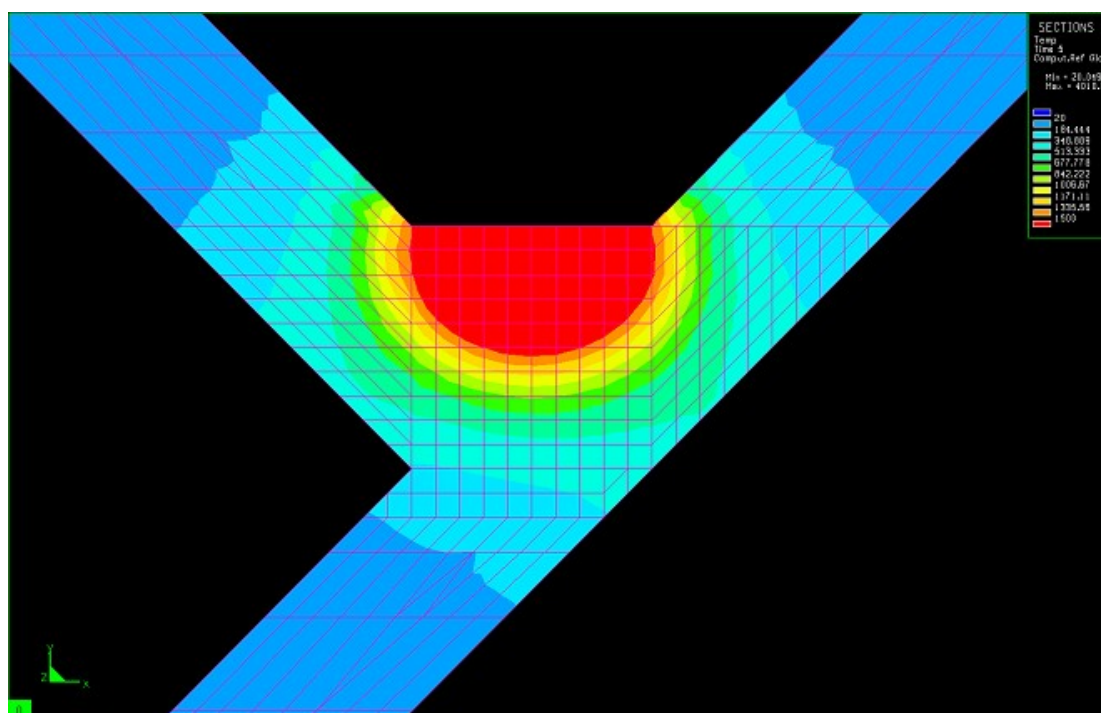
Obr.32b Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A_2



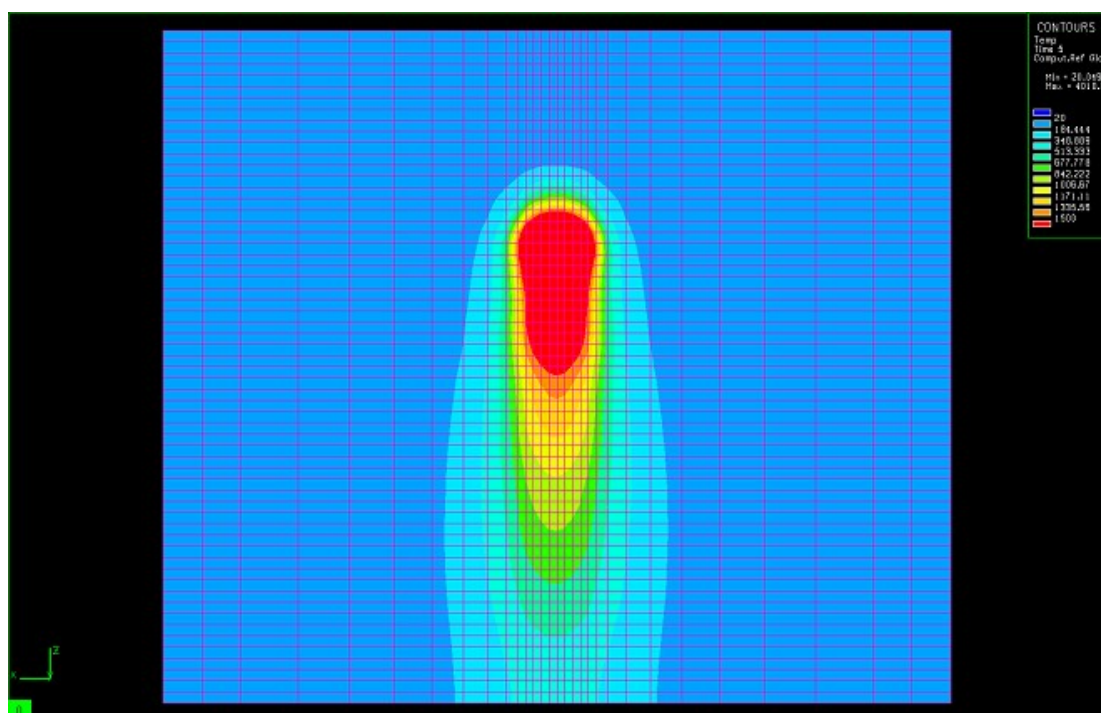
Obr.33a Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A_3



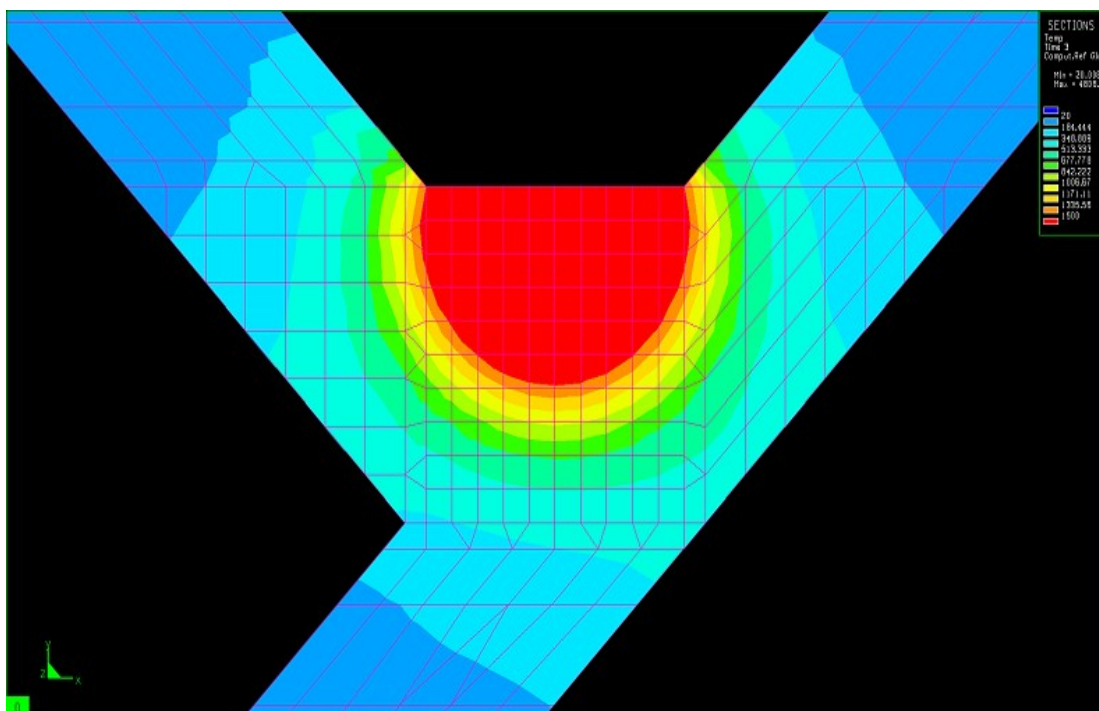
Obr.33b Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A_3



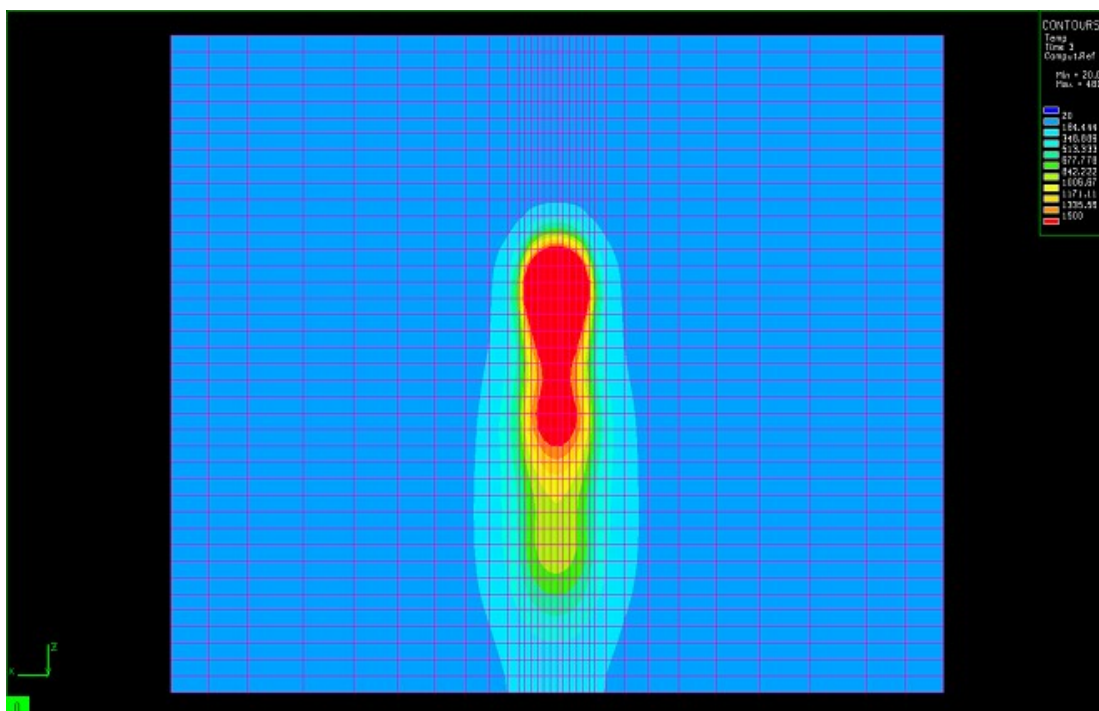
Obr.34a Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A_4



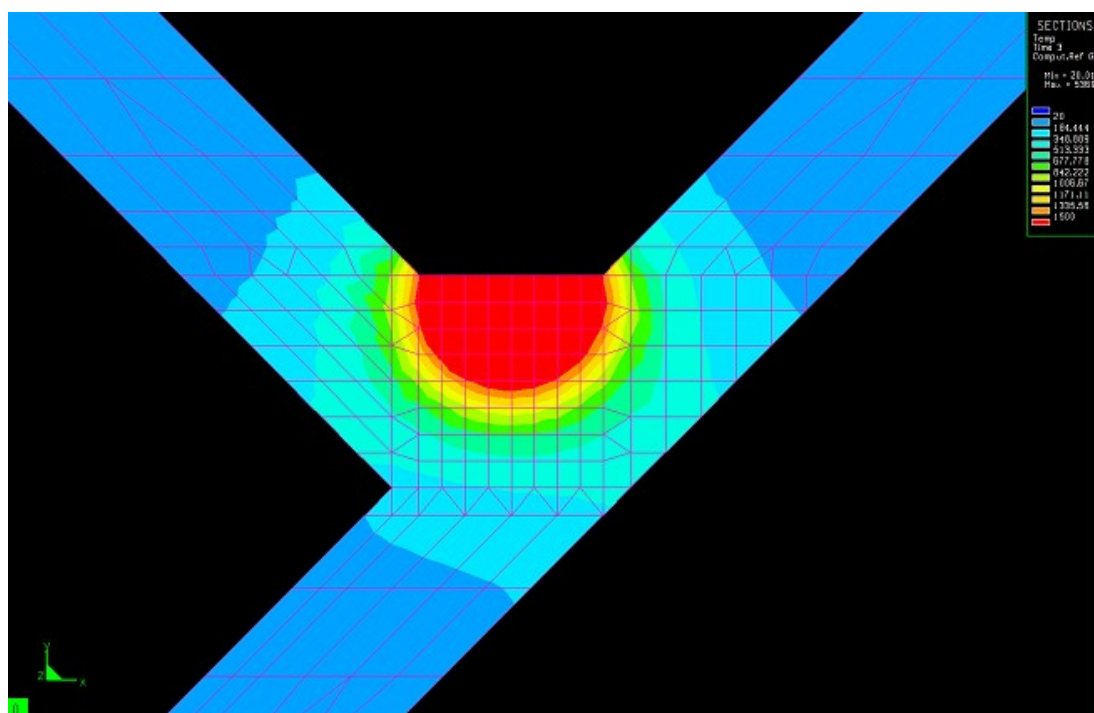
Obr.34b Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A_4



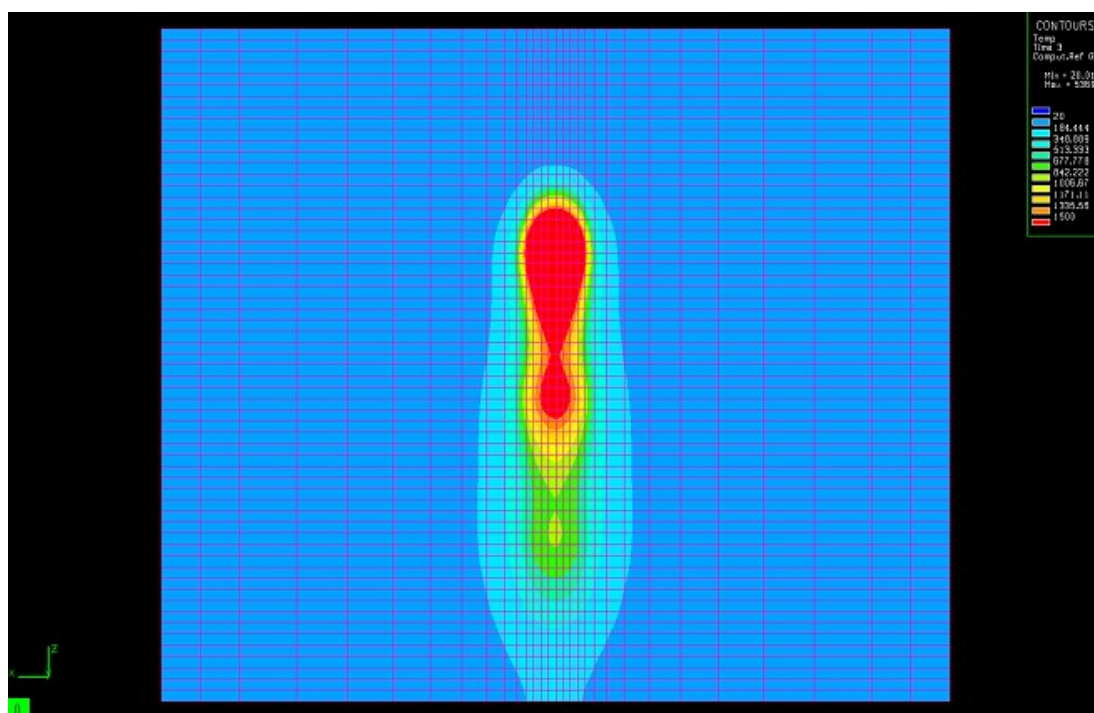
Obr.35a Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A₆



Obr.35b Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A₆



Obr.36a Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena šířka a hloubka pro vzorek A_7



Obr.36b Modifikovaný zdroj tepla, kde je zobrazena délka svarové lázně pro vzorek A_7

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 3.1.2014

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to full amount.

I compiled the thesis on my own with use of acknowledged sources and on the basis of consultation with the the head of the thesis and consultant.

Date: 3.1.2014

Signature